

HPMS-II

High Performance Molten Salt Tower Receiver System – Phase 2

Schlussbericht für das Verbundprojekt HPMS-II

ZE:	FKZ:
DLR e.V.	0324327A
MAN Energy Solutions SE	0324327B
Flexim Flexible Industriemesstechnik GmbH	0324327C
Fachhochschule Aachen, SIJ	0324327D
Assoziierte Partner:	
Endress + Hauser Messtechnik GmbH + Co. KG	
Mannesmann Stainless Tubes	
Holter Regelarmaturen GmbH & Co. KG	
Stahl-Armaturen PERSTA	
Vorhabenbezeichnung:	HPMS-II
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2018 – 31.12.2024
Berichtszeitraum:	01.10.2018 – 31.12.2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren:

Sophie Kappertz	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Dr. Bärbel Schlögl-Knothe	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Kathrin Ingenwepelt	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Matthias Binder	MAN Energy Solutions
Jonas Schulte	Solar-Institut Jülich
Christian Schwager	Solar-Institut Jülich
Florian Angele	Solar-Institut Jülich
Tobias Kunze	Solar-Institut Jülich

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

I. Übersicht Projektgrundlagen.....	2
I.1 Aufgabenstellung	2
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	4
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
II. Darstellung der erzielten Ergebnisse.....	6
II.1 Verwendung der Zuwendung sowie erzielte Ergebnisse in Gegenüberstellung der Vorgegebenen	6
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	7
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	7
II.4 Verwertbarkeit des Ergebnisses	7
II.5 Fortschritt auf dem Projektgebiet durch andere Stellen während Vorhabens	8
II.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	8
III. Zusammenfassung der Arbeitspakete.....	9
III.1 AP1 Spezifikationen und Schnittstellen	9
III.2 AP2 Infrastruktur.....	9
III.3 AP3 Salz-Kreislauf	17
III.4 AP4 Wärmeübergangsmessung Salzströmung in Rohren	18
III.5 AP 5 Testreceiver	23
III.6 AP6 Qualifizierung	27
III.7 AP 7 Versuchsdurchführung Testreceiver	29
III.8 AP8 Weiterentwicklung Simulationsmodelle	36
III.9 AP9 Commercial Design: High Performance Molten Salt Receiver Panel	39

I. Übersicht Projektgrundlagen

I.1 Aufgabenstellung

Der Titel des Projektvorhabens lautet High Performance Molten Salt Tower Receiver System-Entwicklung eines hocheffizienten Receiversystems für Salzturmkraftwerke und beschreibt die Aufgabenstellung ganz allgemein.

Um dieses übergeordnete Ziel der Projektreihe HPMS zu erreichen, soll ein Deutsches Industriekonsortium aufgebaut werden, welches diese Technologie weltweit vermarktet. Innerhalb der ersten Phase des HPMS-Projektes wurden der Receiver und der solare Hochtemperaturkreislauf (Receiversystem) aus technischer und ökonomischer Sicht optimiert. Diese Analyse hat ergeben, dass sogenannte externe Receiverkonzepte aufgrund der hohen Flussdichten und der damit einhergehenden geringen Kosten und den hohen optischen Wirkungsgraden anderen Receiverkonzepten überlegen sind. Deshalb wurde innerhalb des HPMS-II Projektes ein Salzkreislauf entwickelt und zusammen mit dem zugehörigen Subreceiver getestet. Ziel war dabei die Erprobung des in HPMS-I entwickelten Receiver-Konzeptes unter realistischen Bedingungen. Dieser Schritt war erforderlich, um die Weiterentwicklung des Receivers für kraftwerksübliche Leistungen (700MWth) zu ermöglichen. Zudem wurden einzelne Komponenten wie Salzpumpen, Ventile, Isolierung und Messtechnik für den Betrieb mit Salzschnmelzen bei hohen Temperaturen qualifiziert. Die Erprobung des Testsystems unter realistischen Bedingungen zielte vor allem auf den praktischen Erfahrungsgewinn hinsichtlich Receivern mit Salzschnmelze. Der Versuchsaufbau qualifizierte die Komponenten und Werkstoffe und die beteiligten Industriepartner für die Angebotserstellung für kommerzielle Kraftwerke.

Von hoher Wichtigkeit war die möglichst genaue messtechnische Erfassung aller Parameter, um die Simulationsmodelle und somit die Aussagekraft für die Modellierung der Receiver abzusichern. Deshalb wurden in diesem Vorhaben messtechnische Verfahren und die Simulationsmodelle weiterentwickelt und validiert. Beispielsweise durch die Entwicklung und Validierung einer Flussdichte-Messtechnik, welche ohne bewegliche Teile auskommt und somit für industrielle Anwendungen einsetzbar ist. Die Weiterentwicklung der Simulationsmodelle diente zum einen der Vorhersage der Lebensdauer der Komponenten zum anderen einer verlässlichen Vorhersage des thermischen Ertrags des Receivers unter verschiedenen Bedingungen. Eine Weiterentwicklung des Receivers konnte im Anschluss durch die numerischen Simulationsmodelle erfolgen. Dadurch konnten weitere Verbesserungspotenziale, welche die Stromgestehungskosten deutlich absenken können, identifiziert und weiterverfolgt werden. Diese Verbesserungen flossen letztendlich in das Basic Engineering eines solaren Hochtemperaturkreislaufes und Receivers ein.

Ergänzend zur Erprobung des Testreceivers wurden begleitende wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt: Vorherige Forschungsergebnisse gaben Hinweise darauf, dass die bisher genutzten Wärmeübergangskorrelationen den Wärmeübergang von den Absorber-Rohren an die Salzschnmelze überschätzen. Aus diesem Grund wurde der Wärmeübergang für die Strömung der Salzschnmelze in den Absorber- Rohren messtechnisch untersucht. Ein weiteres Ziel dieser Arbeiten war die Untersuchung von Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung der Strömung, um Temperaturgradienten zu reduzieren und so die mögliche Auslasstemperatur des Receivers anzuheben. Die Metrologie und hierbei insbesondere die Genauigkeit der Massenstrommessung spielte eine entscheidende Rolle für die Weiterentwicklung und Standardisierung der Flüssigsalztechnologie. Die bisherige Situation war dadurch gekennzeichnet, dass Massenstrommessungen mit erheblichen und nicht bekannten Unsicherheiten behaftet sind. Um die Phänomene des Wärmeübergangs gezielt zu untersuchen war daher die Bestimmung dieser Unsicherheiten eine Grundvoraussetzung. Weiterhin wurden durch diese Arbeiten

Grundlagen für die Standardisierung der Metrologie gelegt, die für die Qualifizierung von Salz-anlagen und deren Abnahmen von entscheidender Bedeutung sind. Insgesamt können Flüssigsalzanlagen durch eine verbesserte Metrologie weniger konservativ ausgelegt werden, und somit Hemmnisse bei der Markteinführung dieser Technologie abgebaut werden. Als weiteres Ziel, wurde innerhalb des Projektes ein kalibriertes Messsystem für die Messung von Druck in Flüssigsalzen innerhalb des Teststands getestet. Der Schwerpunkt lag hier bei der Beständigkeit der Messmembran.

Während der ersten Phase des Projektes wurden unterschiedliche Werkstoffe auf ihre Eignung für den Betrieb mit Solar Salt getestet. Innerhalb der zweiten Phase wurde das Korrosionsverhalten der vielversprechendsten Kandidaten in weiterführenden Tests detaillierter betrachtet. Vor allem von Interesse waren dabei die Schweißnähte und die Korrosion unter mechanischer Belastung. Die mechanische Auslegung des Receivers durch Festigkeitsnachweise, wie in allen industriellen Anlagen üblich, war mit den bekannten Berechnungsvorschriften nicht möglich. Grund war die inhomogene Belastungssituation durch die solare Bestrahlung. Deshalb sollte im Rahmen des Projektes ein Berechnungsverfahren zur verlässlichen mechanischen Auslegung erarbeitet werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung gefördert. Es fällt unter den Förderbereich „Thermische Kraftwerke“. Ziel dieses Forschungsprogramms ist Forschung, Entwicklung und Innovationen in diversen Forschungsbereichen zu fördern. Schwerpunkt dabei ist die industrielle Forschung und Demonstration von Energietechnologien. Konkret konnten durch dieses Forschungsvorhaben folgende Punkte aus dem Forschungsprogramm bedient werden:

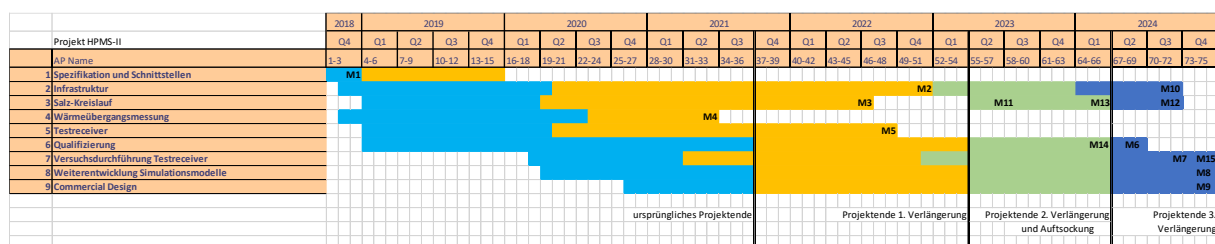
- Exportmöglichkeiten solarer Turmkraftwerke erhöhen
- Pilotprojekte zur kostenoptimierten Energiebereitstellung
- Nutzung und Entwicklung innovativer Technologien für Mess- und Prüfverfahren zur Erfassung der Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Komponenten
- Verbesserung von Receiver-Konzepten und anderer Kraftwerkskomponenten punktfokussierender Systeme

Für das Vorhaben wurde ursprünglich eine Laufzeit von 36 Monaten und Gesamtprojektkosten von 5.232.683 € bei einer geplanten Fördersumme von 3.873.216 € (74,0 %) vorausgesetzt. Diese Planung konnte jedoch nicht eingehalten werden, wie im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Planung der Aufgaben wurde ein Zeitplan erstellt. Dieser wurde im Laufe des Projektes kontinuierlich angepasst. Das Projekt wurde dreimal verlängert. Die Gründe hierfür sind eine höhere Komplexität der Verfahrenstechnik als zuvor angenommen, Verzögerungen in der Infrastruktur-Baumaßnahme sowie der Anlagenbeschaffung, neue Aufgabenstellungen, die zum Erreichen eines erfolgreichen Projektabschlusses erforderlich sind (Wirkungsgradmessung) und Salzleckagen, die zu Stillstandzeiten der Anlage geführt haben. Der Zeitplan des gesamten Projektes ist mit den einzelnen Arbeitspaketen und Meilensteinen dargestellt.

Schlussbericht des Verbundprojektes HPMS-II



I-1 Zeitplan

Zum Erreichen aller Aufgaben wurde ein Meilensteinplan erstellt und der Monat der Fertigstellung festgelegt. Im Zuge der zweiten Aufstockung und Verlängerung wurde dieser Plan um weitere Meilensteine (M10-M15) ergänzt. Die Aufstockungen waren notwendig, da sich aufgrund der höheren Komplexität neue Aufgabenstellungen ergeben haben, die vorab nicht ersichtlich waren.

Tabelle 1: Meilensteine

Nr.	Meilensteine/Ergebnis	Monat Plan	Monat Fix
M1	Spezifikation & Schnittstellendokumente erstellt	3	3
M2	Abnahme des gesamten Testsystems erfolgt	19	51
M3	Nicht solare Inbetriebnahme Salz-Kreislauf	12	47
M4	Messung der Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt	18	33
M5	Abnahme Testreceiver erfolgt	19	47
M6	Qualifizierung abgeschlossen	33	75
M7	Solare Versuche durchgeführt	30	73
M8	Simulationsmodelle validiert	36	75
M9	Konstruktion kommerzieller Receiver erfolgt	36	75
M10	Durchführung Wirkungsgradmessung mit entwickelter Messtechnik	61	72
M11	Kaschierung angebracht	55	57
M12	Betriebserfahrungen Drainage	61	72
M13	Konzept Salzprobenentnahme geprüft	66	66
M14	Korrosionsversuche abgeschlossen	63	66
M15	Zeitersparnis in Betriebsführung aufgewiesen	66	75

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Solarturmkraftwerke mit Salzschnmelzen als Wärmeträger entwickeln sich mehr und mehr zum Industriestandard. Es wird erwartet, dass weitere Kostensenkungen gerade mit dieser Technologie möglich sind. Grund dafür ist die dreidimensionale Konzentration der Solarstrahlung, die eine effiziente Umwandlung der Solarstrahlung in Wärme ermöglicht. Je höher die Konzentration, desto höher ist bei gleicher Leistung der mögliche Receiverwirkungsgrad. Weiterhin können dadurch die Abmessungen des Receivers und somit die Kosten reduziert werden.

Um die Leistungsfähigkeit des Receivers in verschiedenen Lastsituationen (Teil- Last, Wind, Wolkendurchgang usw.) sowie die Lebensdauer der Komponenten beurteilen zu können, bedarf es validierter Simulationsmodelle, die dann auch zur Optimierung des Receivers eingesetzt werden können.

Die meisten Generalunternehmer für solche Kraftwerke setzen auf den Zukauf des Receivers und des Salzkreislaufs von Zulieferern. Dadurch gibt es die Chance, dass sich ein deutsches Konsortium mit zunächst dieser Komponente im Markt behaupten kann. (Bisher gibt es keinen deutschen Hersteller).

Auf der Rohrinneinnenseite der Absorberrohre wird die Wärme durch erzwungene Konvektion an die Salzschnelze übertragen. Obwohl die Wärmeübergänge bei Rohrströmungen gut erforscht sind ergaben sich bzgl. des Wärmeübergangs von Salzschnelzen in Receivern neue Fragestellungen. Besonders kritisch ist die Filntemperatur des Fluids an der Rohrinneinnenseite. Hier werden die höchsten Temperaturen in der gesamten Anlage erreicht. Aufgrund der Instabilität der Salzschnelze bei hohen Temperaturen muss der Receiver so ausgelegt und betrieben werden, dass die maximalen Temperaturen im Fluid nicht überschritten werden. Aus der Literatur ist jedoch bekannt, dass bei sehr hohen Leistungsdichten und/oder Über-temperaturen Stickstoff und Sauerstoff ausgasen können, wodurch sich der Wärmeübergang deutlich verschlechtert. Deshalb ist es erforderlich den Wärmeübergang unter den im Receiver auftretenden Bedingungen (einseitige Beheizung, hohe Temperaturen, zeitliche Gradienten) genau zu kennen.

Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Salzschnelze mit den relativ geringen Fließgeschwindigkeiten (geringe Turbulenz) führt zu relativ großen Temperaturgradienten in der Strömung. Eine gezielte Beeinflussung der Strömung könnte die Durchmischung verbessern und sogar den Wärmeübergang gezielt erhöhen. Eine Reduktion der Filntemperatur wäre die Folge. Somit könnte die mittlere Temperatur der Auslasstemperatur gesteigert werden.

Die sehr hohen Leistungsdichten (bis 1.5 MW/m^2) in Kombination mit einem begrenzten Wärmeübergang der Salzströmung führen zu Temperaturgradienten innerhalb der Wand der Absorberrohre. Die einseitige Bestrahlung führt zu Gradienten über den Rohrumfang. Weiterhin ist die Flussdichte über den gesamten Receiver inhomogen verteilt, sodass auch hier Temperaturgradienten auftreten. Infolge der zeitlichen Änderung der Einstrahlung (Tages, Jahreszeit, Wolkendurchgang, An- und Abfahren) kommt es zu einer zyklischen Belastung, die in Kombination mit dem Innendruck (30 bar) und den relativ hohen Materialtemperaturen (bis zu $650 \text{ }^\circ\text{C}$) die Lebensdauer der Rohre maßgeblich bestimmt. Im kommerziellen Einsatz muss die Lebensdauer allerdings ausreichend genau vorhersagbar sein. Weiterhin ist eine Abnahme des Receivers als Druckgerät unabdingbar.

Das Belastungsszenario weicht allerdings deutlich von denen anderer Wärmeübertrager ab. Einschlägig bekannte Regelwerke (AD-Merkblätter, TRD usw.) stoßen hier an ihre Grenzen. Mit Hilfe von am DLR entwickelten Werkzeugen in Kombination mit FE- Modellen können durch Simulation der Solarstrahlungsverteilung auf dem Receiver und anderen thermischen und mechanischen Randbedingungen die Spannungen für verschiedene Lastsituationen bestimmt werden. Dieses Verfahren bedarf allerdings einer Akzeptanz durch die für die Abnahme verantwortlichen Stellen und einer entsprechenden Qualifizierung.

Die Flussdichte-Messtechnik des Standes der Technik funktioniert über Schwenkbalken, welche über den Receiver bewegt werden. Dieses Messprinzip lässt sich nur sehr aufwändig auf spätere industrielle Receiver übertragen. Vorarbeiten im Bereich der Messung ohne Schwenkbalken auf offenen, volumetrischen Receivern laufen derzeit, für Rohrreceiver müssen aber andere Korrekturen angewendet werden.

Die orts aufgelöste Messung der Oberflächentemperaturen bei bestrahlten Versuchskörpern ist sehr komplex. Durch Reflexion der Infrarotstrahlung (von anderen Bauteilen) ist die Genauigkeit bei Verwendung von Standard IR-Kameras nicht ausreichend. Um die Auswertung der geplanten Wärmeübergangsmessung ermöglichen zu können ist die Entwicklung eines neuen Messsystems erforderlich.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zum Aufbau der Salzsammelanlage im Multifokusturm in Jülich wurden Baumaßnahmen an der Turminfrastruktur notwendig. Diese Maßnahmen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Baumanagement des DLR geplant und durchgeführt. So konnte der Salzkreislauf und Receiver in den Multifokusturm integriert werden.

Die Installation des Salzkreislaufs ist als eigenes Forschungsvorhaben durch das Bundesland NRW gefördert und begleitet worden. Dieser Aufbau ging Hand in Hand mit dem Aufbau des Receiversystems, welches im Projekt HPMS-II untergebracht war. Die Verzahnung und Zusammenarbeit der beiden Projekte lief gut, sodass am Ende der Salzkreislauf mit Receiversystem in Jülich betriebsbereit installiert wurde.

Außerdem war dieses Forschungsvorhaben eng mit anderen Vorhaben verbunden. Die in diesem Vorhaben entwickelte Anlagensteuerung wurde beispielsweise im Vorhaben LOBSTeR (03EE5006A-B) durch MAN, DLR und der Hochschule Düsseldorf um einen modellprädiktiven Regler und ein Lebensdauer-Monitoringsystem erweitert.

Die Ergebnisse dieses Projektes sind auch in das Verbundprojekt STERN (03EE5048) miteingeflossen. Das Projekt nutzt ebenfalls die errichtete Versuchsanlage bestehend aus Salzkreislauf und Receiversystem. STERN läuft noch bis Ende 2025.

II. Darstellung der erzielten Ergebnisse

II.1 Verwendung der Zuwendung sowie erzielte Ergebnisse in Gegenüberstellung der Vorgegebenen

DLR: Die Zuwendung wurde zum größten Teil wie im Projektantrag geplant verwendet. Es wurden lediglich 2 Umwidmungen mit entsprechender Begründung vorgenommen. Die Personalkosten nehmen den größten Teil der Zuwendung ein, da das DLR als Projektpartner mit bestehendem Know-How im Solarforschungsbereich hauptsächlich die Auslegung und Ausarbeitung der Anlage sowie den Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung als auch die Entwicklung und Errichtung von Messtechnik übernommen hat.

MAN: Die Arbeiten wurden wie geplant, beziehungsweise zum Teil auch mit erheblichem Mehraufwand, durchgeführt. Die wesentlichen Aufgaben waren dabei neben der Anlagenplanung, die Fertigung des Receivers, die Beprobung der Receivermaterialien, die Weiterentwicklung der Simulationsmodelle und der Entwurf eines kommerziellen Receiverdesigns. Umwidmungen ermöglichten weitere Arbeiten an der Testanlage, sowie die Beprobung weiterer Materialien im Korrosionsprüfstand.

SIJ: Das SIJ hat die Zuwendung entsprechend der im Projektantrag, den Änderungsanträgen und den Aufstockungen definierten Arbeiten und Ziele verwendet. Die gesteckten Ziele wurden erreicht und die Arbeiten erfolgreich durchgeführt. Das SIJ hat wie in der Vorhabensbeschreibung festgelegt, an der Entwicklung des Testsystems und des kommerziellen Receiverdesigns mitgewirkt. Der Fokus lag dabei auf der Unterstützung des Prozesses durch dynamische Simulation und die Entwicklung von Regelungs- und Betriebskonzepten. Die Ergebnisse sind, wie bereits unter I.3 gezeigt, mit den erreichten Meilensteinen erzielt worden. Außerdem folgt eine ausführliche Beschreibung der erreichten Ergebnisse in den jeweiligen Arbeitspaketen unter III.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

DLR: Die Personalkosten nehmen den größten Teil der Zuwendung ein. Das Projekt wurde von Beginn an durch DLR Mitarbeiter betreut und die Auslegungen, Installationen, Versuchsdurchführungen, Auswertungen und Berichte erstellt. Die Materialkosten sind die zweithöchste Position. Diese wurden für den Aufbau der Anlage sowie für Erweiterung der Messtechnik und zur Behebung der Schäden der Salzleckagen verwendet. Die Kosten für die Verwendung der Testeinrichtungen (Heliostatfeld und Versuchsebene) sind die dritthöchste Position und absolut notwendig zur Versuchsdurchführung und somit Erzielung von Ergebnissen.

MAN: Auch bei MAN nehmen Personalkosten den größten Teil der Zuwendungen ein. Das Verhältnis aus Personal- und Materialkosten beläuft sich auf 12/1. Die Arbeitspakete mit dem höchsten Mittelbedarf waren: AP3 Entwicklung des Salzkreislaufes, AP6 Qualifizierung, AP5 Testreceiver und AP9 Kommerzielles Design.

SIJ: Auch am SIJ dominierten die Personalkosten die Zuwendung. Das SIJ hat sich vorrangig mit Aufgabenstellungen rund um die Auslegung der Steuerung und Modellierung des Testsystems und des kommerziellen Receivers befasst. Insbesondere das Erstellen der detaillierten dynamischen Modelle war personalintensiv.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle geleisteten Arbeiten waren im durchgeführten Umfang notwendig, um eine erfolgreiche Versuchsdurchführung und abschließende Bewertung des Receiversystems sowie Validierung der Simulationsmodelle zu erreichen. Die Details der geleisteten Arbeit sind unter III nochmals ausführlich beschrieben.

II.4 Verwertbarkeit des Ergebnisses

MAN: MAN konnte durch dieses Projekt die Kompetenzen im Bereich von Flüssigsalzschmelzen hin zu höheren Temperaturbereichen (bis 600 °C) weiterentwickeln. Dies ist neben der Anwendung in solarthermischen Kraftwerken auch für die Reaktionstechnik von Bedeutung. Denn dieses Wissen kann auch auf isotherme Prozesse im Bereich der heterogenen Katalyse angewendet werden. Aufgrund der veränderten Marktsituation, erscheint eine direkte Umsetzung von solarthermischen Receivern für MAN derzeit als unmöglich. Dennoch können die gesammelten Erfahrungen beim Betrieb von Anlagen in diesem Temperaturbereich für Speichertechnologien mit Salzschnmelze als Wärmeträgermedium Anwendung finden.

DLR: Das DLR konnte mit dem Projekt seine international führende Position im Bereich der Solarturmsysteme weiter ausbauen und sein Anlagenportfolio auf dem Gebiet der Turmsysteme komplettieren. Durch den im Projekt erbauten Flüssigsalztestkreislauf und -receiver in Jülich wurde neben den theoretischen Untersuchungen das experimentelle Know-how erweitert. Zudem konnte eine neue Messmethode zur Bestimmung des Wirkungsgrades von Rohrreivern sowie eine Messmethode zur Flussdichtemessung entwickelt und erprobt werden. Im Projekt entwickelte das DLR zudem ein neues, dynamisches Simulationsmodell für Solarturmsysteme mit Salzschnmelze als Wärmeträgermedium und erweitert das Know-how im Bereich der Salzschnmelzen. Die gesamten Ergebnisse konnten in Veröffentlichungen, Dissertationen, Konferenzbeiträgen wissenschaftlich verwertet werden (siehe II.6).

SIJ: Das Solar-Institut Jülich hat in dem Projekt seine Kompetenzen im Bereich dynamischer Modellierung komplexer und mehrphasiger solarthermischer Systeme weiter Ausbauen und mit Erfahrungen in der der Entwicklung intelligenter Steuerungen verknüpfen können. Die vom SIJ entwickelten und nun auch mit Versuchsdaten des Testreceivers validierten Modelle können nun zur virtuellen Optimierung flüssigsalzbasierter Systeme dienen. Außerdem können

die Modelle als virtuelle Versuchsumgebung für Tests neuer Regelungs- und Steuerungssysteme verwendet werden, bevor diese in die reale Anlage Einzug finden. Damit wird in der Zukunft sowohl der Versuchsaufwand reduziert, als auch das Risiko bei den Versuchen verringert. Die vom SIJ erzeugten Ergebnisse für das kommerzielle Receiverdesign, eröffnen die Möglichkeit Designverbesserungen vorzunehmen und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Technologie zu stärken.

II.5 Fortschritt auf dem Projektgebiet durch andere Stellen während Vorhabens

Wie bereits unter I.5 erwähnt wurde durch die Zusammenarbeit mit anderen Projekten innerhalb des DLR (wie z.B. LOBSTeR) weitere Ergebnisse erzielt. Diese Projekte haben von den Testdaten der Versuchskampagne profitiert und konnten Ergebnisse in anderen Themenfeldern (die nicht Bestandteil dieses Projektes waren) erzielen.

Weitere Fortschritte in den Projektthemen dieses Projektes (wie die Entwicklung einer Flussdichtemessung oder Wirkungsgradbestimmung) durch andere sind nicht bekannt. Es gibt auch weiterhin keinen deutschen Hersteller für Salzsammelreceiver am Markt.

II.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Tabelle 2 Veröffentlichungen

Titel	Ort	Datum
Basic Engineering of a High Performance Molten Salt Tower Receiver System	Online, SolarPaces	09.2020
Life cycle assessment of DMV310Nsolar for the HPMSII solar test receiver	Düsseldorf, FVWHT	11.2020
Die transiente thermo-optische Simulation der solaren Erwärmung eines Testreceivers (Bachelorarbeit)	Bachelorarbeit Hochschule Osnabrück	03.2021
Detailed Engineering of a High Performance Molten Salt Tower Receiver System	ASME ES	06.2021
Test setup for the experimental evaluation of the convective heat transfer for nitrate salt in tubular solar receivers	ASME ES	04.2021
Experimental Receiver Setup of a High Performance Molten Salt Test Receiver System	Online, SolarPaces	09.2021
Preheat Strategy of a Molten Salt Test Receiver	Online, SolarPaces	09.2021
Commissioning of a Solar Salt Test Setup for Central Receiver Operation at 600°C	SolarPaces	09.2022
Commissioning of a Preheat Strategy of a Molten Salt Test Receiver	SolarPaces	09.2022
Experimental Analysis of Forced Convective Heat Transfer of Nitrate Salt in Circular Tube at High Reynolds Numbers and Temperatures	International Journal of Heat and Mass Transfer	01.2023
Flow Distribution in Molten Salt Receiver Panels at High Flux Gradients	SolarPaces	10.2023

Experimental Validation of an Analytical Model – Emergency cooling of a closed molten salt central receiver system	SolarPaces	10.2023
Korrosion von Edelstählen und Nickelbasislegierung in Nitratsalzsäure	Düsseldorf, FVWHT	11.2024

III. Zusammenfassung der Arbeitspakete

III.1 AP1 Spezifikationen und Schnittstellen

Zu Projektbeginn wurden im Konsortium die Ergebnisse aus den Vorgängerprojekten, besonders HPMS-I, analysiert und bewertet. Zusätzlich sind dabei Erkenntnisse aus dem aktuellen Stand der Technik eingeflossen. Darauf basierend wurden die Anforderungen an den Receiver, den Salzkreislauf und die Teststrecke überarbeitet. Dabei erfolgte ein grundlegendes Review des Designs, da sich seit dem Design aus HPMS-I mehrere Änderungen ergeben haben: Aufbau des Salzkreislaufes im MFT statt im STJ, Entkopplung der Teststrecke vom Salzkreislauf (nun in der TESIS-Anlage integriert). Als weiterer Schritt wurde ein Testplan erarbeitet, damit sichergestellt werden kann, dass die angestrebten Projektziele in der erforderlichen Qualität erreicht werden können. Die darin definierten Tests haben Einfluss auf die Ausführung von Komponenten, Spezifikationen von Messtechnik und Anforderungen an den Anlagenbetrieb.

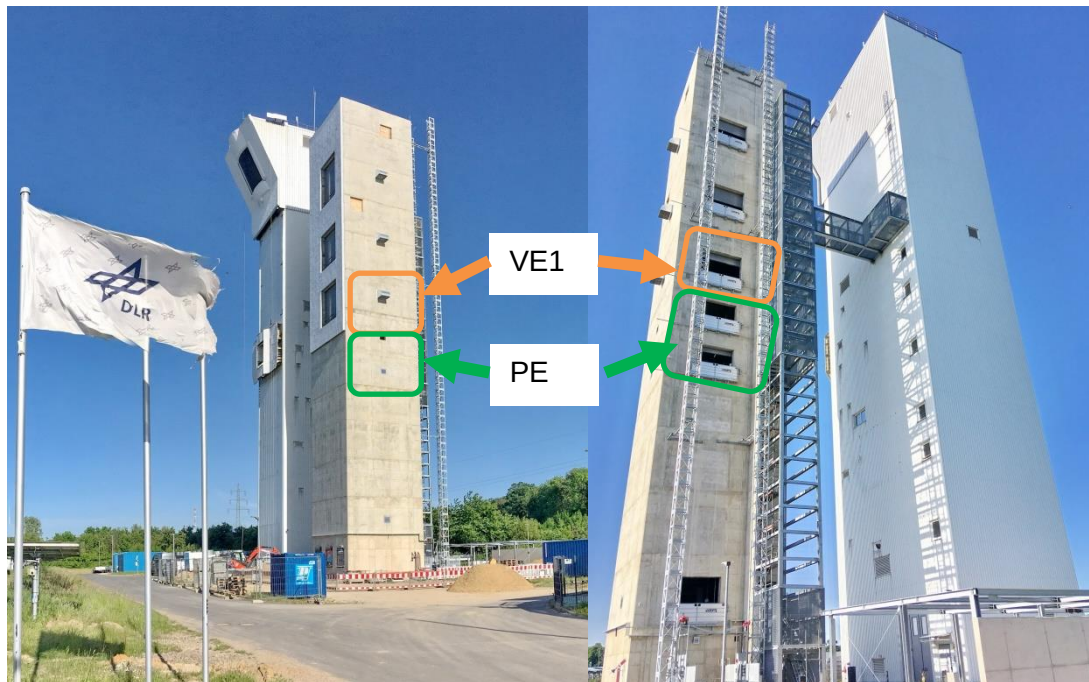
Nach dem Designreview wurde ein Spezifikationsdokument erstellt, das alle Punkte erfasst, die für das Engineering und die Ausführung definiert werden müssen. Parallel dazu wurde ein zweites Dokument mit den Schnittstellen aufgesetzt. Dieses deckt neben den technischen Schnittstellen auch die Zuordnung der Verantwortlichkeiten ab. Darin sind den unterschiedlichen Prozessen (Basic Engineering, Detail Engineering, Beschaffung, Installation, Qualitätskontrolle etc.) für die jeweilige Komponenten Zuständigkeiten zugeordnet. Darüber hinaus werden damit auch übergeordnete Aufgaben erfasst (zum Beispiel Statik, Brandschutz, Arbeitssicherheit) und Verantwortlichkeiten zugewiesen. Als letztes dient dieses Dokument auch der Schnittstelle zum Multifokusturm, um die Abstimmung zwischen AP2 und AP3 an zentraler Stelle zu dokumentieren. Beide Dokumente wurden kontinuierlich durch alle Partner gepflegt und angepasst.

Für die Abnahme der Gesamtanlage steht die Druckabnahme im Vordergrund. Da der Receiver in einer kommerziellen Anlage im Regelfalle im außereuropäischen Ausland eingesetzt wird, wird dort als Auslegungscode der amerikanische AMSE-Standard zum Tragen kommen. Dazu musste geklärt werden, unter welchen Anwendungsbereich („Section“) der Receiver fällt. Des Weiteren musste das Zusammenspiel mit dem restlichen Salzkreislauf und die Abnahme als Gesamtanlage abgestimmt werden. Dazu wurden zum einen mit der DLR-internen Abteilung für Produktsicherheit als auch mit einer zu diesem Zweck beauftragten notifizierten Stelle (Lloyds Register) Gespräche geführt.

III.2 AP2 Infrastruktur

Planung und Koordination Baumaßnahmen: Das Projekt HPMS-II/SALSA gliedert sich in bautechnische (VOB-Leistungen) und anlagentechnische (VOL-Leistung) Teile. Im Rahmen des Projekts Multifokusturm (MFT) in Jülich wurden bereits Planungen bis zur Leistungsphase 4 für die Nutzung zusätzlicher Peripherieebenen berücksichtigt. Die Baugenehmigung für den

MFT wurde am 15.08.2018 erteilt. Um einen effizienten Einsatz der Fördermittel zu ermöglichen, wurde eine Parallelisierung von Planung und Bauausführung des MFT mit den VOB-Leistungen von HPMS-II angestrebt. Eine wirtschaftliche Verlegung der Peripherieebene von HPMS-II/SALSA auf +18,75 m OKFF ermöglichte eine Raumhöhe von ca. 7,16 m und reduzierte die Leitungswege sowie die elektrische Leistung. Deckenanschlagpunkte und Luftkühlung wurden entsprechend integriert. Die Zugänglichkeit der Peripherieebene ist gewährleistet. Die Bauarbeiten am MFT begannen am 13. Mai 2019 und wurden offiziell 11/2020 abgeschlossen. Die parallelisierten Maßnahmen zur Bauausführung des MFT mit den VOB-Leistungen von HPMS-II/SALSA wurden abschließend umgesetzt. Die Peripherieebene zur Aufnahme des Salzkreislaufs wurde gemäß den definierten Randbedingungen der Abstimmungsplanung integriert. Die Baufertigstellung wurde offiziell angezeigt, und finale Montagen sowie Restarbeiten wurden abgeschlossen. Die Gebäudeleittechnik wurde übergeben, und Überwachungsräume sowie Strahlungsschutz wurden fertiggestellt.



III- 1: Multifokusturm in Vorderansicht (links) mit Hitzeschutzfassade und Rückansicht (rechts) mit Außenaufzug, Rolltoröffnungen, und Treppenzugang zu VE1 und PE



III- 2: Versuchsebene 1 Nord-Panorama mit Öffnungsstrahlungsschutz

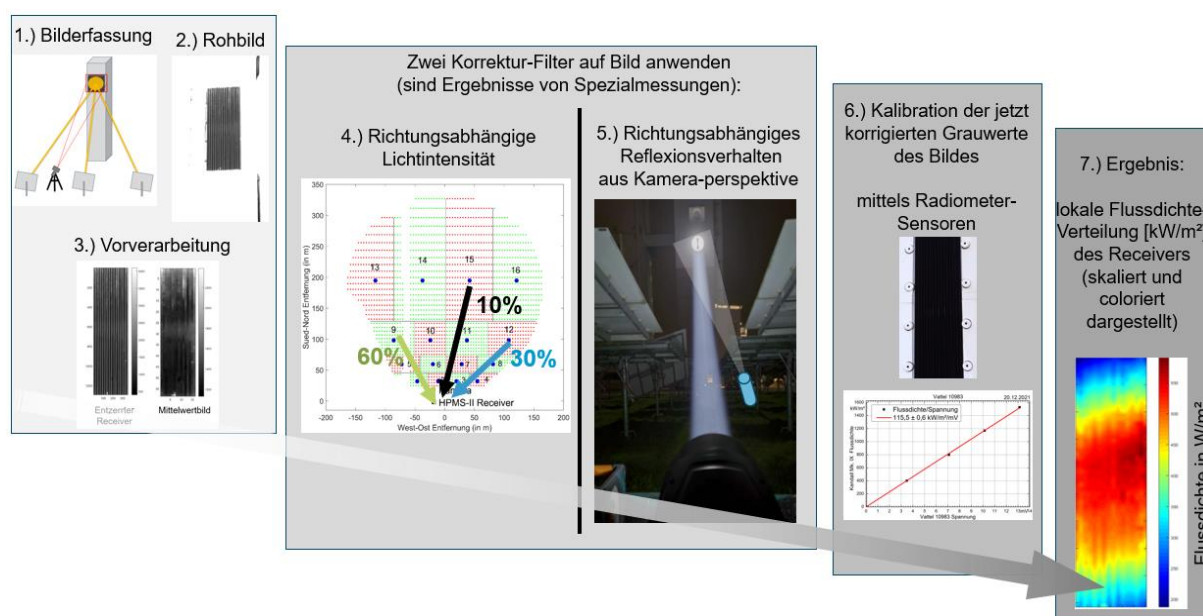
Qualifizierung Heliostatfeld für Höchstflussdichten: Das Heliostatenfeld des DLR-Standortes Jülich dient sowohl für den Betrieb des Solarturms (STJ) als auch für den neu gebauten Multifokusturm (MFT). Es wurde in den letzten Jahren renoviert und mit einer neuen Steuerung (Projekt HeliOS) versehen, um den Anforderungen von Forschungsprojekten wie HPMS-II gerecht zu werden. Parallel dazu wurden Prototypen-Umbauten und Tests durchgeführt, um die Heliostate zu verbessern und den Betrieb sicherzustellen. Die Steuerung erfolgt durch die HeliOS-Software, die die Bereitstellung und Steuerung des Heliostatfeldes übernimmt. Die Schnittstelle zwischen HeliOS und der HPMS-II-Salzreceiver-Steuerung wurde definiert und implementiert, um einen sicheren und effektiven Betrieb zu gewährleisten. Die Verbesserungen umfassen die Verminderung des Pointing Errors und des Verschleißes der Heliostate.

Parallel dazu wurden die mechanischen Umrüstarbeiten für das Heliostatenfeld begonnen, die aufgrund von COVID-19-Verspätungen leicht verzögert wurden. Die HeliOS-Software wurde entwickelt und implementiert, sowie die Schnittstelle zwischen HeliOS und SALSA SPS entwickelt und getestet. Die Daten werden über ein Gateway zwischen den Netzwerken ausgetauscht. Die Steuerung und das Datenlogging wurden angepasst und getestet, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Dies umfasst die Vorwärmung des Receivers und die Steuerung der Heliostate. Alle Tests und Überprüfungen wurden erfolgreich abgeschlossen. Im Nachgang kam es beim Betrieb der Anlage zu Kommunikationsproblemen zwischen der SALSA-PLC und HeliOS bei einem anstehenden Defokus-II aus der SALSA-Anlage. Der Defokus II konnte nicht zurückgesetzt werden, da das Signal "Standby Lastheliostaten" aus der Heliostatfeldsteuerung HeliOS nicht übertragen werden konnte. Hierfür wurde ein Override-Switch in der SALSA-PLC und in der Visualisierung als Lösung festgelegt. Dieser ermöglicht es dem Operator, das Signal "Standby Lastheliostaten" zeitlich begrenzt zu setzen, um den Defokus-II zu quittieren und die Kommunikation wiederherzustellen. Der gesamte Quittierungsprozess wurde in einer separaten Betriebsanweisung festgelegt.

Aufbau des Flussdichtemesssystems: Die Bestimmung der eingestrahnten thermischen Leistung (optische Flussdichte) auf der Receiverfläche erfolgt durch Radiometer. Je vier Radiometer werden links und rechts des Rohrbündels im Strahlungsschutz installiert, wobei runde Aussparungen im Strahlungsschutz für den Träger der Radiometer vorgesehen sind. Die Radiometer liefern analoge Spannungssignale, die in 4...20 mA-Signale umgewandelt werden. Die Messdaten werden an einen Messrechner im Überwachungsraum des Multifokusturms zur Auswertung übermittelt. Zur Kühlung der Radiometer wird Leitungswasser verwendet. Die Flussdichte wird durch Verschieben des Fokus über die Radiometer bestimmt. Ein FMAS-System wird zur Bestimmung der Flussdichteverteilung eingesetzt. Darüber hinaus wird ein kamerabasiertes Messsystem verwendet, das die vom Receiver reflektierte Strahlung nutzt. Dieses Verfahren ermöglicht laufende Messungen während des ungestörten Betriebs bei geringerer Messgenauigkeit. Die Radiometer und Kameras werden an die SALSA-SPS und HeliOS angeschlossen. Die Radiometerkalibrierung erfolgt im Sonnenofen des DLR.

- **Signalwandler:** Radiometer liefern Spannungssignale im mV-Bereich, die in 4–20 mA-Stromsignale umgewandelt werden.
- **Kühlwasser:** Radiometer benötigen 0,4 bis 4 L/min Kühlwasser bei einer Bestrahlung von 1000 kW/m², wobei 2,8 L/min als Standard kalibriert werden. Die Zuleitung liefert 26,9 L/min, was pro Radiometer etwa 3,4 L/min ergibt.
- **Weiterentwicklung Flussdichtemessung:** Installation einer Kamera zur qualitativen und quantitativen Messung der Flussdichteverteilung. Verwendung eines MatLab-Scriptes und des DLR-Scan-Verfahrens. Vergleich der ermittelten Flussdichten mit dem Fokusverschiebungsverfahren.
- **Scan-Verfahren:** Anwendung des Scan-Verfahrens zur Bestimmung der Reflexionseigenschaften des Receivers. Erstellung eines Maximalbildes zur Simulation homogener Bestrahlung. Verwendung der Grauwerte des Maximalbildes zur Korrektur der aufgenommenen Bilder.
- **Versuche:** Durchführung von 16 Scan-Versuchen aus verschiedenen im Heliostatfeld. Bedienung des Scheinwerfers durch ein Mikrocontroller-Programm, das über DMX-Protokoll und WLAN gesteuert wird.
- **Ergebnisse:** Scan-Ergebnisse liefern Aussagen über das Reflexionsverhalten und die Richtungszusammensetzung der Strahlung. Erstellung einer qualitativen Strahlungsflussdichteverteilung und deren Umwandlung in quantitative Werte.

- **Korrektur und Optimierung:** Korrektur der Bilder durch Interpolation und Elimination von Reflexionen. Verbesserung der Messgenauigkeit durch neue Kameraperspektive und Simulationsdaten.
- **studentische Hilfskraft:** Einstellung einer studentischen Hilfskraft zur Unterstützung bei der Optimierung der Kameraposition und der Reflexionskorrekturen. Fortschritt der Arbeit in einer Masterarbeit.
- **Simulation:** Nutzung der Simulationssoftware „SPRAY“ zur Quantifizierung der Verluste und zur Korrektur der Flussdichte auf den Receiverrohren. Entwicklung eines Modells des Receivers mit verbogenen Rohren.



III- 3: Das Scan-Verfahren zur Messung der Strahlungsflussdichte

Design und Fertigung und Aufbau Strahlungsschutz: Die Arbeiten zur Implementierung eines Strahlungsschutzes für die HPMS-II-Anlage wurden im Projekt abgeschlossen. Die Öffnung zur Versuchsebene beträgt 4,5 m x 4 m, jedoch wird diese durch einen modularen Strahlungsschutz auf 4,5 m x 2,2 m verringert. Der Strahlungsschutz schützt den Raum hinter dem Receiver vor konzentrierter Solarstrahlung. Absprachen mit dem Projektpartner MAN wurden getroffen, und ein Strahlungsschutzkonzept sowie eine Vorkonstruktion des Experimentstrahlungsschutzes wurden entwickelt. Ein Klammersystem zur Verringerung thermischer Spannungen wurde konstruiert, und die Gewichtsablastung des Strahlungsschutzes wurde von einer Kragarmhalterung am Receiverrahmen auf eine eigene Fußaufstellung geändert. Die Detailplanung und -konstruktion des Experiment-Strahlungsschutzes wurden abgeschlossen, und die Fa. Ceprotec GmbH führte diese Arbeiten durch. Die Montagereihenfolge von Receiver und Strahlungsschutz wurde festgelegt. Die Abdichtung des Bereiches zwischen Experiment-Strahlungsschutz und Multifokusturm-Strahlungsschutz sowie die Integration von Radiometer zur Flussdichteerfassung wurden durchgeführt. Die Rohrisolation zwischen Receiver und Sammler wurde installiert, sowie eine Ummantelung zur konvektiven Wärmeabfuhr. Abschließend wurden die Radiometer montiert und der gesamte Strahlungsschutzbereich auf Leckagen geprüft. Der Experimentstrahlungsschutz der HPMS-II-Anlage wurde somit fertiggestellt.



III- 4: Strahlungsschutz mit Receiver (+22,50 m)

Anpassung Infrastruktur: Neben der baulichen Errichtung der Peripherieebene im MFT wurden weitere Anpassungen an der Infrastruktur vorgenommen, um den Flüssigsalzkreislauf zu versorgen. Bei diesem Unter-AP erfolgten beratende Tätigkeiten durch MAN. Die beschriebenen Maßnahmen flossen als Nachtrag über eine entsprechend eingereichte Bedarfsanpassung in die Baumaßnahme HPMS-II/SALSA ein und wurden im Zuge der fortschreitenden Arbeiten am MFT umgesetzt. Dies umfasst folgende Arbeiten:

Stahlbau-Ebene: Zur Lastaufnahme des Salzspeichers und besseren Zugänglichkeit der in der Peripherieebene aufgestellten Anlagenkomponenten wurde eine Stahlbau-Zwischenebene errichtet, die aus Stahlträgern und Gitterrosten besteht. Die Hauptträger für den Salzspeicher wurden mit entsprechenden statisch geprüften Anschlagpunkten versehen, und Stahlträger dienten der Lastaufnahme des Rückkühlers. Die Ebene kann im leeren Zustand nach unten hin zu Montagezwecken geöffnet werden.

Zweites Rolltor mit Aufzughaltestelle: Um im Falle einer Havarie der Anlage mit austretendem Salzinventar eine ausreichende Belüftung der Peripherieebene sicherzustellen und die Zugänglichkeit zu verbessern, wurde die Peripherieebene mit einem Rolltor und einem Haltepunkt für den Lastenaufzug versehen.



III- 5: Übersicht Peripherieebene (+22,50 m)



III- 6: Übersicht Peripherieebene (+18,75 m)

Anpassung der elektrischen Absicherung: Um die elektrische Absicherung der Peripherieebene als Nachtrag in Auftrag zu geben, wurde die elektrische Maximallast der Peripherieebene HPMS-II/SALSA von 100 kW auf 175 kW erhöht.

Im Zuge der detaillierten Schaltschrankplanung in AP3 ergaben die Stromverbräuche der einzelnen Lastfälle unter Berücksichtigung von Gleichzeitigkeit eine max. Stromaufnahme von 344A. Daher muss die aktuelle Absicherung des SALSA Hauptschranks von 320A auf 350A erhöht werden. Hierzu sind weitere Anpassungen an der MFT Infrastruktur notwendig, deren Planung extern an Consulectra vergeben wurde. Die Ausführung der Anpassung wird durch den DLR Rahmenvertragspartner Hartung & Casper vorgenommen.

In den Jahren 2021 und 2022 wurden weitere Anpassungen an der MFT Infrastruktur vorgenommen, wie die Erhöhung der Absicherung des SALSA Hauptschranks von 320A auf 350A und Tests an den Zuleitungen vom Gaslager in den MFT, um die Bereitstellung der Betriebsluft für die SALSA Anlage aus dem Gaslager zu gewährleisten.

Integration der Komponenten: Zur Aufstellplanung in AP3 wurden ein 3D-Modell der Versuchsebene 1 und der Peripherieebene des MFT erstellt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Hier erfolgten Kollisions- und Maßkontrollen, die eine iterative Montageplanung ermöglichten. Die Gesamtanlage SALSA und die Salztankaufhängung wurden einer statischen Prüfung unterzogen und entsprechen den Lastvorgaben des Multifokusturms. Im Mai 2021 wurden die ersten großen Komponenten des Salzkreislaufs geliefert und montiert. Die Kernbohrung für die Steig- und Fallleitungen wurde vorbereitet. Das erstellte 3D-Modell wurde für regelmäßige Kontrollen und die Montageplanung genutzt. Im Zuge der Montagearbeiten stellte sich das Bohren in die Stahlbetondecke als schwierig heraus, sodass die Rohraufhängung über einen zusätzlichen Stahlbau gewährleistet wurde. Ab August 2021 wurden die restlichen mechanischen Komponenten des Salzkreislaufs geliefert und montiert.

Inbetriebnahme Messtechnik, Steuer- und Regelungstechnik: In diesem Unterarbeitspaket wurde die Installation der IR-Kamera abgeschlossen. Die Arbeiten an der Flusssichtemessmethode und der Continuous Power On Methode wurden in anderen Unterarbeitspaketen fortgesetzt. Die Inbetriebnahme von Mess-, Steuer- und Regeltechnik wurde in enger Absprache mit den Projektpartnern in AP3 durchgeführt. Zwei Infrarotkameras aus dem DLR-Bestand wurden zur Überwachung der Temperaturen an Receiver- und Strahlungsschutzoberfläche bei solarer Bestrahlung genutzt. Eine Sonderkalibrierung der VarioCam HD Head von InfraTec wurde durchgeführt, um die Hauptüberwachungskamera für Receivertemperaturen von 100-800°C zu kalibrieren. Somit kann die Variocam HD Head allein zur Temperaturüberwachung der Receiverbestrahlung genutzt werden. Ein SDK-Tool wurde in die InfraTec Software implementiert, um Rohbilder in MATLAB auszuwerten.

VarioCam HD Head (InfraTec)



- Mast HS-Feld + Gehäuse (~70m)
- Spektralbereich: 7,5µm – 14µm
- Kalibrierung: 250°C - 800°C

ImageIR 8380 (InfraTec)



- Stativ (~25m)
- Spektralbereich: 2µm – 5 µm
- Kalibrierung: -50°C – 1200°C

III- 7: Infrarotkameras und ihre Aufnahmen von den bestrahlten Receiverrohren

Abnahme des Versuchsaufbaus durch benannte Stelle: Für eine optimale Grundlage der Abnahme der Anlage wurden die Ausschreibungsunterlagen für den Anlagenbau des Salzkreislaufs von Lloyds Register geprüft. Die Vergabe des Anlagenbaus an MAN SE als Generalunternehmer umfasst die Vorgaben für einen abnahmefähigen Salzkreislauf, einschließlich der offiziellen Abnahme durch die benannte Stelle. Lloyds Register wurde bei Bedarf beratend hinzugezogen. Bei der Abnahme des Gesamtsystems mit dem TÜV wurde unter anderem die TÜV-Bauprüfungen der Einzelteile, die Dokumentation der Baustellentätigkeiten, die CE-Kennzeichnung aller eingesetzten Geräte sowie die Gesamtanlage inklusive deren Steuerung, Verkabelung und Verfahrenstechnik geprüft. Eine virtuelle Inbetriebnahme des Systems wurde durchgeführt, die eine gute Tauglichkeit bescheinigte. Die durchgeführten Arbeiten sind in

AP3.7 abgedeckt. Der TÜV-Bericht mit offenen Punkten zum ZÜS wurde erstellt, und der Gefahrenübergang der SALSA-Anlage von MAN an das DLR konnte Ende 2022 erfolgen. Die Umsetzung der offenen Punkte wurde durch MAN bei der Wiederinbetriebnahme der SALSA-Anlage nach der Winterpause abgeschlossen. Der finale Schlussbericht des TÜV wurde am 22.05.2023 erstellt, und es bestehen sicherheitstechnisch keine Bedenken gegen den Betrieb der Anlage.

III.3 AP3 Salz-Kreislauf

Im Arbeitspaket AP 3.1 wurden die Grundlagen für den Aufbau des Salzkreislaufsystems erarbeitet. Dies umfasste die Erstellung erster Anlagenschemata und die Beschreibung der Hauptkomponenten wie Salzleitungen, Ein- und Auslasstank, Speichertank mit Salzpumpe und Rückkühler. Basierend auf den Ergebnissen aus dem Vorgänger-Projekt HPMS wurde das Anlagenschema detaillierter ausgearbeitet. Betriebszustände und Schrittketten, die während des Betriebs auftreten können, wurden definiert und in einem Petri-Diagramm visualisiert. Diese Diagramme halfen dabei, die Komplexität der Anlage zu verstehen und die notwendigen Schritte für einen reibungslosen Betrieb zu planen. Parallel dazu wurde ein Prozess- und Instrumentierungsdiagramm (P&ID) erstellt, das die Rohrleitungen und Instrumente der Anlage abbildet.

In AP 3.2 wurde eine HAZOP-Studie (Hazard and Operability) durchgeführt, um die Sicherheit der technischen Anlage zu gewährleisten. Die Studie identifizierte potenzielle Gefahren und operative Risiken, die anschließend im Prozess- und Instrumentierungsdiagramm (P&ID) und im Regelungskonzept implementiert wurden. Eine ergänzende Sicherheitsstudie wurde durchgeführt, um Änderungen und Optimierungen zu überprüfen und zu bestätigen. Diese Studien sind entscheidend, um sicherzustellen, dass die Anlage sicher betrieben werden kann und alle potenziellen Risiken minimiert werden.

Das Arbeitspaket AP 3.3 konzentrierte sich auf die detaillierte Auslegung der Kreislaufkomponenten, einschließlich der Salztanks, Rohrleitungen und des Kühlers. MAN erstellte die finalen Spezifikationsdatenblätter und Zeichnungen für die Ausschreibung. Die Rohrleitungsplanung und Auslegungsrechnungen wurden durchgeführt, um die optimale Führung der Rohrleitungen zu gewährleisten. Ein CAD-Modell der gesamten Anlage wurde erstellt und in das bestehende Modell des Multifokusturms integriert. Diese detaillierte Planung war notwendig, um sicherzustellen, dass alle Komponenten korrekt dimensioniert und installiert wurden, um einen effizienten und sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Das Regelungskonzept (AP 3.4) des HPMS-II Systems umfasst insgesamt 11 Regelkreise. Die Regelung des Rückkühlers und die Drehzahlregelung der Salzpumpe sind bereits in den Komponenten integriert. Die Sensoren und Stellglieder der einzelnen Regelkreise wurden schematisch dargestellt und die Regelparameter durch das SIJ mit Hilfe dynamischer Simulationen bestimmt. Diese Simulationen halfen dabei, die optimalen Einstellungen für die Regelkreise zu finden und sicherzustellen, dass das System unter verschiedenen Betriebsbedingungen stabil und effizient arbeitet.

In Arbeitspaket AP 3.5 wurde ein Vorschlag für die Heizkreise der Begleitheizung entwickelt. Die Heizkreise wurden so definiert, dass sie alle Betriebszustände des Kreislaufs abdecken. Die Anzahl und Aufteilung der Heizkreise sowie die Position der Thermoelemente wurden in Abstimmung zwischen DLR und MAN festgelegt. Eine Spezifikation der Begleitheizung und der Isolierung wurde erstellt. Diese Maßnahmen sind wichtig, um sicherzustellen, dass beim Anlagenbetrieb weder Salz einfriert noch die zulässigen Temperaturen überschritten werden und so die Anlage zuverlässig funktioniert.

Basierend auf der Vorauslegung des Kühlers und der Spezifikation wurden in AP 3.6 Ausschreibungsunterlagen für den Kühler erstellt. Diese umfassen das Engineering, die Fertigung, Montage und Inbetriebnahme des Kühlers durch den Auftragnehmer. Der Anlagenbau, die Montage und die Inbetriebnahme des Salzkreislaufs wurden EU-weit ausgeschrieben. Diese Ausschreibungen sind notwendig, um die besten Anbieter für die verschiedenen Komponenten und Dienstleistungen zu finden und sicherzustellen, dass die Anlage nach den höchsten Standards gebaut wird.

Die Fertigungsbetreuung des Salzkreislaufs (AP 3.7) begann mit der Vergabe des Anlagenbaus an MAN. Parallel dazu lief die Fertigungsbetreuung des Kühlers durch die Fa. IGEFA. Ein Reviewtermin wurde durchgeführt, um Aspekte wie Arbeitssicherheit, Montagereihenfolge und Wartungsmöglichkeiten zu beleuchten. Die Behälter für den Salzkreislauf wurden gefertigt und vor Ort montiert. Die intensive Betreuung ist entscheidend, um sicherzustellen, dass alle Komponenten korrekt gefertigt und installiert werden und dass alle Sicherheits- und Qualitätsstandards eingehalten werden.

Eine nicht-solare Inbetriebnahme der Anlage (AP 3.8) wurde durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit des Systems zu testen. Nach einem erfolgreichen IO-Check und weiteren Funktionstests wurde die Anlage mit Wasser getestet. Die technische Abnahme erfolgte durch eine 5-tägige Testfahrt mit Wasser, bei der alle Betriebszustände und Regelkreise überprüft wurden. Diese Tests sind wichtig, um sicherzustellen, dass das System wie geplant funktioniert und alle Komponenten korrekt integriert sind.

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 3.9 wurden Dauertests des Salzkreislaufsystems durchgeführt, um die langfristige Leistungsfähigkeit zu überprüfen. Die Tests umfassten die Prüfung des automatischen Steuerungssystems, der Kontrollsysteme sowie der Hauptalarme und Notabschaltverfahren. Die Ergebnisse zeigten eine fehlerfrei laufende Anlage, die die geforderte Performance erfüllte. Diese Tests sind entscheidend, um sicherzustellen, dass das System über einen längeren Zeitraum zuverlässig funktioniert und keine unerwarteten Probleme auftreten.

Das Arbeitspaket AP 3.10 befasste sich mit der Anpassung der Verfahrenstechnik für den kommerziellen Betrieb. In diesem Arbeitspaket wurde vor allem eine Kaschierung der Rohrleitungen und Behälter installiert. Durch die Implementierung der Kaschierung konnten gesundheitliche und technische Risiken minimiert werden. Zudem ist die Anlage dadurch optisch deutlich ansprechender und kann auch für Besucher zugänglich gemacht werden.

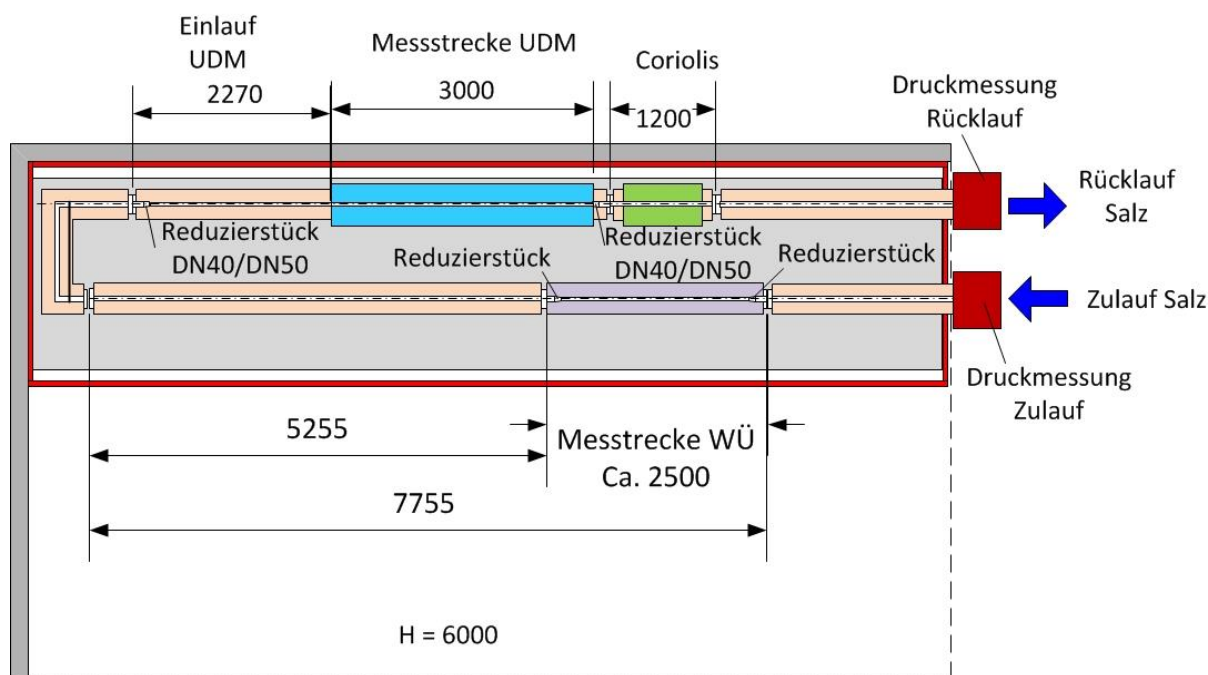
In Arbeitspaket AP 3.11 wurden die Auswirkungen eines längeren Betriebs auf den Salzkreislauf untersucht, insbesondere die NO_x-Emissionen und die Salzdegradation. Ein defekter NO_x-Sensor wurde ausgetauscht und ein Ein- und Ausschalter installiert, um die NO_x-Emissionen bei zukünftigen Versuchen zu messen. Zudem wurden Salzproben entnommen, die in Zukunft analysiert werden sollen. Diese Studien sind wichtig, um die langfristigen Auswirkungen des Betriebs auf die Anlage und die Umwelt zu verstehen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.

III.4 AP4 Wärmeübergangsmessung Salzströmung in Rohren

Ziel des Arbeitspakets ist die Entwicklung eines Teststandes und die Durchführung von Testkampagnen:

- Zur Messung des Wärmeübergangs von Nitratsalzen in Absorberrohren
- Zur Qualifizierung von Ultraschalldurchflussmessgeräten für den Hochtemperaturbetrieb mit Flüssigsalzen
- Zur Qualifizierung einer Druckmessung für den Betrieb mit Nitratsalzen

Hierzu wurde ein Flüssigsalztteststand innerhalb der Teststrecke der TESIS:com Anlage des DLR in Köln aufgebaut. Die Position der einzelnen Teststände innerhalb der TESIS:com Anlage ist der folgenden Abbildung zu entnehmen. Die Temperaturmessung im Tank (UDM1) befindet sich im Speichertank der TESIS:com Anlage. Alle weiteren Teststände werden innerhalb der Teststrecke aufgebaut. Zur Auslegung der einzelnen Teststände wurden die Randbedingungen der TESIS:com Anlage untersucht und fehlende Daten berechnet und anhand von Datenblättern kalkuliert.



III- 8: Position der einzelnen Teststände innerhalb der TESIS:com Teststrecke

Qualifizierung Durchflussmessung für Massenstrommessungen in Flüssigsalzen: FLEXIM entwickelt eine Ultraschalldurchflussmessung (UDM) auf Basis des Laufzeitdifferenzverfahrens für Temperaturen bis zu 600°C. Bisherige Sensoren haben eine maximale Einsatztemperatur von 200°C. Durch den Einsatz von Wellenleiterblechen können die Einsatztemperaturen auf bis zu 600°C erhöht werden. FLEXIM untersucht mit Unterstützung vom DLR einen Prototypen, der ohne Wellenleiter auskommt und somit direkt unter der Isolierung des Rohres installiert werden kann. Zur Qualifizierung der Messung wurde eine Unsicherheitsanalyse durch das DLR durchgeführt. Es wurden Simulationen erstellt, um die Messunsicherheiten zu reduzieren und den besten Messaufbau zur Verfügung zu stellen. Den UDM-Sensoren wird im Hochtemperaturbereich (490°C; 560°C) als Referenz die Füllstandsmessung gegenübergestellt und die Stabilität der Referenz, die Wiederholbarkeit der Messungen und die Wiederholbarkeit des Messfehlers ausgewertet. Bei den Niedertemperaturversuchen wurde ein Coriolissensor verbaut, der als zusätzliche Referenzmessung gilt.

Letztlich konnte die Füllstandsmessung nicht wie geplant dazu genutzt werden, die UDM von Flexim zu kalibrieren. Allerdings konnte gezeigt werden, dass die Wellenleiter (WI)-Messungen stabil über Temperatur und Konvektionsbedingungen messen können. Die Prototypen Hochtemperatur (HT-Sensoren) haben zu Anfang sehr gute Diagnosewerte geliefert. Gerade bezogen auf die Amplitude haben sie deutlich bessere Ergebnisse als die WI's gezeigt. Trotzdem müssen an den Prototypen noch weitere Verbesserungen vorgenommen werden, dass sie so zuverlässig und langzeitstabil wie die WI-Messungen werden.

Mit Hilfe der Auswertung an den unterschiedlichen Messtellen konnte folgendes untersucht werden:

- Einfluss der Konvektionsbedingungen an den Waveinjectoren
- Linearität über die verschiedenen Massenströme
- Temperaturabhängigkeit der UDM

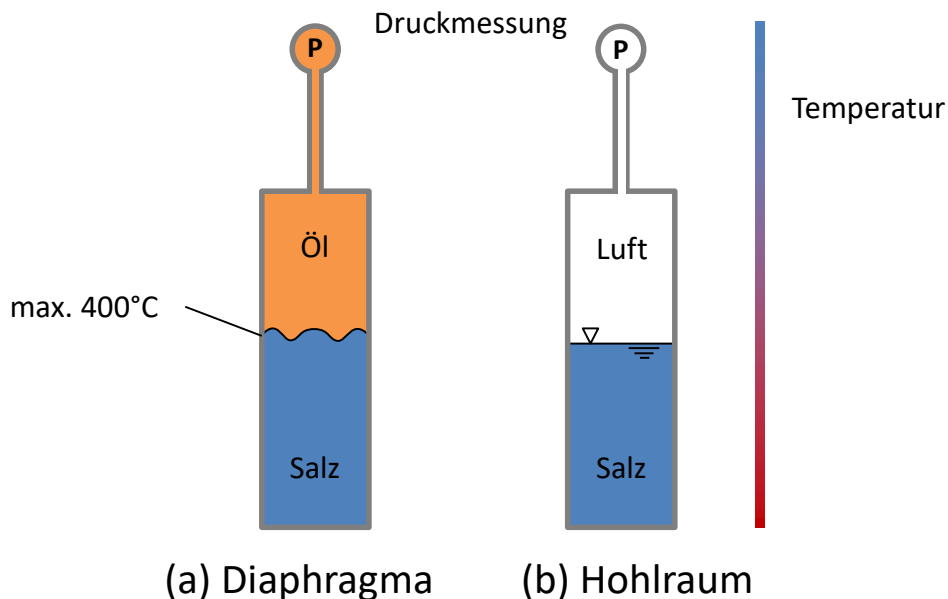


Die Messungen haben geholfen, die UDM mit Waveinjectoren besser beurteilen zu können und es konnten Verbesserungen für die ebenfalls getesteten HT-Prototypen erarbeitet werden. Der gesamte Messstand beim DLR in Köln wurde wieder demontiert und teilweise zurück zu Flexim geschickt. Die drei UDM mit Waveinjector, welche in den Versuchsreihen die stabilsten Ergebnisse gezeigt haben, wurden beim DLR in Köln demontiert und in Jülich montiert. In Abbildung III- 9 ist beispielhaft die Installation der Sensoren und des Fluxus in Versuchsebene 1 im Multifokusturm gezeigt.

III- 9: Installation WI und Fluxus in Versuchsebene 1

Qualifizierung Druckmessung in Flüssigsalzen: Die Arbeiten zur Druckmessung wurden im Wesentlichen durch E+H durchgeführt. E+H wählte eine geeignete Messmembran und Druckmittler aus, sodass der Sensor eine Korrosionsstabilität gegenüber den Nitratsalzen aufweist. Außerdem verfügt der Druckmittler über eine Prozessmembran, damit er selbst nicht im Kontakt mit dem Nitratsalz steht. Für die Druckmessung wurden zwei verschiedene Optionen identifiziert, die in der Anlage realisiert werden sollen. Die erste Option (vgl. Abbildung III- 10 a) nutzt eine Standardlösung mit einem Diaphragma. Dieses trennt das flüssige Salz von einem mit Thermoöl gefülltem Hohlraum über eine flexible Membran. Hierdurch stellt sich in Öl und Salz der gleiche Druck ein. Über eine Druckleitung wird der Druck im Öl an einer Position gemessen, an der die Temperatur auf Umgebungsniveau abgesunken ist. Hierbei darf die Temperatur an dem Diaphragma nicht die Zersetzungstemperatur des Öls von 400°C überschreiten.

Die Alternative (vgl. Abbildung III- 10 b) sieht einen gasdichten Hohlraum vor. In diesem stellt sich dann der gleiche Druck wie im Salz ein und der Druck kann über eine Druckleitung an ein Messinstrument weitergeleitet werden. Hierbei muss der Hohlraum ausreichend groß sein und es muss sichergestellt sein, dass keine Luft aus dem Hohlraum mitgerissen wird. Andernfalls könnte das Salzniveau bis zur Druckleitung ansteigen und diese verstopfen.



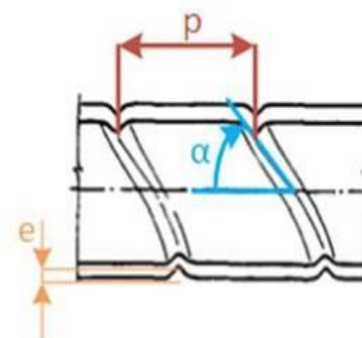
III- 10: Optionen zur Ausführung der Druckmessung: (a) Druck wird über Diaphragma an Zwischenmedium (Öl) übertragen und Druck wird im kälteren Bereich gemessen, (b) Ein Gasdichter Hohlraum bildet sich über dem Salz und Druck in dem gasgefüllten Hohlraum wird gemessen

Nach einem ersten Testlauf der Druckmessungen in der Anlage wurden Verbesserungsmaßnahmen definiert und umgesetzt. Der Drucktransmitter PMP75 wird durch ein Prototypgerät getauscht, das mit Flüssigmetall anstelle von Thermoöl befüllt ist. Das Flüssigmetall ist unempfindlicher gegenüber Temperaturen oberhalb von 400°C. Der Transmitter mit der druckabnehmenden Membran wird auf das gleiche Höhenniveau gebracht. Die Kapillare werden isoliert, um sie vor thermischen Einflüssen und Erschütterungen zu schützen. Der Drucksensor von Gems Sensor wurde bei erhöhtem Gegendruck durch eindringendes Flüssigsalz zerstört. Daher hat dieser ein kürzeres Verbindungsrohr erhalten. Durch das kürzere Rohr wird das Luftpolster zwischen Sensor und Salz verringert. Das kürzere Rohr hat den Vorteil, dass falls flüssiges Salz aufsteigt dieses hierzu einen höheren Druck benötigt um bis in das Rohr und an den Sensor zu gelangen als bisher. Hierdurch entsteht kein Siphoneffekt mehr im Rohr in dem das Salz sich absetzen, erstarren und das Luftpolster abschneiden kann. Die abschließenden Messungen haben bei Betrachtung des gemessenen Druckverlustes über der Reynoldszahl gezeigt, dass der quadratische Verlauf trotz der unterschiedlichen Druckniveaus gut wiedergegeben werden kann.

Untersuchung von Maßnahmen zur Steigerung des Wärmeübergangs: Als erstes wurde ein Berechnungsmodell auf Basis von analytischen Korrelationen für strukturierte Rohre aufgesetzt. Dieses Modell wird genutzt, um eine optimierte Rohrgeometrie für die Strukturierung herzuleiten. Es gilt: eine höhere Rippenhöhe verbessert den Wärmeübergang. Ein geringer Rippenabstand, bzw. eine höhere Gängigkeit verbessert den Wärmeübergang. Dieser Effekt ist stärker umso höher der Rippenwinkel ist. Die möglichen Steigerungsraten der Nußelt-Zahl befinden sich im Bereich Faktor 1,0 bis 3,4. Somit wäre aus einer rein Nußelt-Zahl getriebenen Betrachtung eine Variante mit großem Rippenwinkel, geringem Rippenabstand und großer Rippenhöhe zu bevorzugen. Bereits geringe Rippenhöhen, und Rippenabstände führen jedoch zu einer starken Erhöhung des Druckverlustes, dieser Effekt verstärkt sich überproportional bei großen Rippenwinkeln. Des Weiteren gilt: umso höher die Gängigkeit, umso höher die Steigerung des Druckverlustes. Somit geht zum Beispiel die Variante mit der höchsten

Steigerung der Nußelt-zahl (Faktor 3,4) mit einer überproportionalen Steigerung des Druckverlustes einher (Faktor 15). Um den gewünschten Reynoldszahlbereich bis zu $Re=300'000$ mit dem verfügbaren Equipment in der TESIS:com Anlage zu erreichen sind Varianten zu bevorzugen, bei welchen eine akzeptable Steigerung des Druckverlustes gegeben ist (max. Faktor 2). Unter Berücksichtigung der Fertigungsmöglichkeiten beim Hersteller (Fa. MPG-Tubes) wurde in einem iterativen Prozess folgende Strukturierung ausgewählt und durch die Fa. MPG-Tubes beigestellt. Somit ist entsprechend Korrelation eine maximale Steigerung des Druckverlustes um den Faktor 2 und eine mittlere Steigerung der Nußelt Zahl um den Faktor 1,6 zu erwarten.

Spezifikation DLR	
Werkstoff	1.4878 (321H)
Innendurchmesser	22,9 mm
Wandstärke	2 mm
Art der Strukturierung	Gedrallt, 1-gängig, innen
Rippenwinkel (alpha)	73,7°
Rippenhöhe (e)	0,4 mm
Rippenabstand (p)	21 mm



III- 11: Oben Links: Spezifikation gedrahtes Rohr; Oben Rechts: Definition Rippenwinkel (α), Rippenhöhe (e) und Rippenabstand (p); Unten: 3-gängig und 1-gängig gedrahtes Rohr

Wärmeübergangsmessung von Salzströmungen in Rohren: Es wurde eine Recherche durchgeführt, um den zu erwartenden Reynoldszahlbereichs einer kommerziellen Anlage abschätzen zu können. Aus der Studie ergibt sich ein Re-Zahl Bereich bis zu 100'000 bei 290°C und bis zu 270'000 bei 565°C. Als untere Grenze der Re-Zahl wird die Grenze zur laminar-turbulenten Übergangsbereich mit einer Re-Zahl von 10'000 gewählt. Aus der Literatur ist bekannt, dass Receiver im turbulenten Bereich betrieben werden sollten. Zur weiteren Spezifizierung des Strömungszustands in Receivern wurden die Randbedingungen des hydrodynamischen Einlaufs untersucht. Da eine typische bestrahlte Absorberlänge kommerzieller Receiver 15 bis 30 m beträgt und eine Strömung nach einer Strecke von 10 bis zu 60 mal Rohrinne Durchmesser als hydrodynamisch eingelaufen gilt, befinden sich unter konservativen Annahmen

mindestens 80% der Strömung im Receiverpanel unter hydrodynamisch eingelaufenen Bedingungen. Aus diesem Grund wird der Teststand für die Wärmeübergangsmessung so ausgelegt, dass die Strömung in der Teststrecke hydrodynamisch eingelaufen ist. Zur Aufprägung unterschiedlicher Flusssichten wurden 2 Beheizungskonzepte untersucht und am Ende eine Induktionsheizung im Teststand verbaut.

Nach einer erfolgten Testphase wurde die Nusselt-Zahl-messung mit Flüssigsalz für das Glattrohr für eine Temperatur von 300°C Salz und eine Flusssichte von 1 MW/m² ausgewertet. Das vorläufige Ergebnis ist, dass in diesem Temperatur- und Reynoldszahlbereich eine gute Übereinstimmung der gemessenen Nusselt-Zahl mit der Gnielinski-korrelation zu beobachten ist. Der erzwungene konvektive Wärmeübergang mit Solarsalz wird für drei Haupteintrittstemperaturen des Salzes gemessen: 300 °C, 400 °C und 550 °C, was zu Prandtl-Zahlen zwischen 10 und 3,8 führt. Bei jeder Temperatur werden bis zu 5 verschiedene Massenströme untersucht. Dieser Ansatz führt zu Reynolds-Zahlen zwischen 14'000 und 222'000. Für jede Kombination von Massenstrom und Temperatur werden drei verschiedene Flusssichten verwendet: 330 kW/m², 630 kW/m² und 930 kW/m². Um die Messergebnisse zu reproduzieren, wurde eine Korrelation mit den Messdaten nach der Methode der kleinsten Quadrate erstellt. Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den durch die Gnielinski-Korrelation erwarteten Nusselt-Zahlen und den gemessenen mittleren Nusselt-Zahlen festgestellt, wobei 76 % der Messungen innerhalb einer Abweichung von ± 7 % und 97 % der Messungen innerhalb einer Abweichung von ± 10 % lagen. Besonderes Augenmerk wird auf den Einfluss von Innenwandtemperaturen von mehr als 600 °C auf den Wärmeübergang gelegt. Die Messungen zeigen, dass Innenwandtemperaturen von bis zu 630 °C bei den in diesem Versuch vorliegenden Verweilzeiten nicht zu einer Verringerung des konvektiven Wärmeübergangs auf das Salz in der Heizstrecke führen. Daraus wird gefolgert, dass die Gnielinski-Korrelation für die Vorhersage der Nusselt-Zahlen von Solarsalz in glatten Rohren unter den in diesem Experiment vorliegenden Bedingungen gut geeignet ist.

Des Weiteren wurde der erzwungene konvektive Wärmeübergang und die Druckdifferenz von "Solar Salt" in einem spiralförmig gedrahten Rohr untersucht. Die Messungen des erzwungenen konvektiven Wärmeübergangs wurden für drei Haupteintrittstemperaturen des Salzes durchgeführt: 300 °C, 400 °C und 550 °C, was zu Prandtl-Zahlen zwischen 10 und 3,7 führt. Bei jeder Temperatur wurden bis zu 5 verschiedene Massenströme untersucht. Dieser Ansatz führt zu Reynoldszahlen zwischen 11'000 und 285'000. Für jede Kombination von Massenstrom und Temperatur wurden bis zu drei verschiedene Flusssichten angewendet: 330 kW/m², 630 kW/m² und 930 kW/m². Die Experimente zur Ermittlung der Widerstandsbeiwerte zeigen, dass die allgemeine Korrelation für das Widerstandsbeiwerte Verhältnis das gemessene Widerstandsbeiwerte Verhältnis um einen Faktor von 1,8 bis 2,9 überschätzt.

Bei den Experimenten mit Reynoldszahlen >25'000 wird ein Anstieg der Nusselt-Zahl von etwa $1,19 \pm 0,14$ beobachtet. Die abgeleiteten Nusselt-Zahl-Verhältnisse des spiralförmig verstärkten Rohres sind jedoch deutlich niedriger als die durch die allgemeinen Korrelationen vorhergesagten Werte, liegen aber immer noch innerhalb des für die allgemeinen Korrelationen angegebenen Unsicherheitsbereichs von ± 20 % bis ± 50 %. Die Messungen im Re-Zahlenbereich 11'000-25'000 zeigen für das spiralförmig gedrahtte Rohr im Vergleich zum glatten Rohr eine geringe bis keine Erhöhung des Wärmeübergangs. Dies steht im Widerspruch zu den Messungen anderer Autoren.

III.5 AP 5 Testreceiver

Die Überprüfung des in HPMS entwickelten Designs (AP 5.1) für den Testreceiver ergab, dass dieses Konzept zu weit vom Design kommerzieller Receiver abweicht. MAN Energy Solutions

möchte den grundsätzlichen Aufbau des Testreceivers möglichst nahe an das Design kommerzieller Receiver anlehnen, um beispielsweise thermische Spannungen an den Übergängen von den Sammlern zu den Receiverrohren besser untersuchen zu können. Diese Übergänge sind bei Temperaturwechseln besonders kritisch und bedürfen daher besonderer Beachtung sowohl beim Design als auch in der Fertigung. Die Analyse der Auslegungsparameter, wie Rohrdurchmesser, Druckverlust und Strömungscharakteristik, wurde vom DLR durchgeführt. Die Anpassung des Designs erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen MAN und DLR.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurde in AP 5.2 ein neues Konzept für den Testreceiver entwickelt, das sich stark an kommerziellen Receivern orientiert. Das Design umfasst Receiverrohre, die oben und unten mit Sammlern verbunden sind. Zudem gewährleisten Trennwände in den Sammlern eine mäanderförmige Durchströmung des Receivers. Diese Trennwände sind notwendig, um jeweils zwei Absorberrohre parallel zu durchströmen. Ein entscheidender Aspekt des Designs ist die vollständige Drainage des Salzes, um Blockaden durch erstarrtes Salz zu vermeiden. Die Drainage erfolgt durch Schwerkraft, weshalb alle Rohrleitungen mit Gefälle in Drainagerichtung ausgeführt sind. Um die Zwischenkammern des unteren Sammlers zu entleeren, sind eigene Drainageventile notwendig. Die konstruktive Ausarbeitung und das CAD-Modell wurden von MAN erstellt, basierend auf Vorgaben vom DLR.

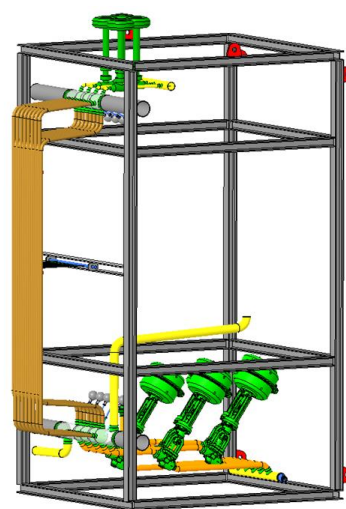
Das im Pre-Design entworfene Konzept wurde in AP 5.3 detaillierter ausgeführt und bezüglich fertigungstechnischer Aspekte überarbeitet. Dies umfasst beispielsweise ein Lagerungskonzept, das große Längenänderungen aufgrund von Wärmeausdehnung ermöglicht. Der Testreceiver wurde in einem Stahlrahmen montiert, der sowohl als Transport- als auch als Montagerahmen dient. Die Materialwahl für die Komponenten wurde zwischen DLR, MAN und Mannesmann Stainless Tubes (MST) abgestimmt, wobei Aspekte wie Korrosion, Festigkeit, Verfügbarkeit und Preis berücksichtigt wurden. Die Receiverrohre wurden letztendlich aus dem von MST beigestellten Material 310N gefertigt.

Parallel dazu wurden in AP 5.4 die verfahrenstechnischen Fließbilder des Receivers entwickelt und ausgearbeitet. Beginnend mit einfachen Handskizzen zu Blockfließbild und Prozessfließbild (PFD) wurde der Detaillierungsgrad immer weiter gesteigert. Das Prozess- und Instrumentierungsdiagramm (P&ID) zeigt den mäanderförmigen Strömungspfad und die Anordnung der Drainageventile. Bei einem Ausfall der Stromversorgung wird durch die Öffnung des Drainageventils am ersten Sammler ein alternativer Strömungsweg geschaffen, der die Kühlung des Testreceivers ohne Hilfsenergie gewährleistet. Zusätzlich ist der Receiver mit zahlreichen Temperaturmessstellen ausgestattet, die für die Überwachung und Sammlung von Messdaten im Versuchsbetrieb benötigt werden.

Der verfügbare Bauraum (AP 5.5) für den Testreceiver war aufgrund der Deckenhöhe und der Größe der Öffnung in Richtung Heliostatenfeld stark eingeschränkt. Dies war eine weitere Einschränkung für die Ausführung des Receivers. Die Montage der Entlüftungsventile am oberen Sammler des Testreceivers war beispielsweise nur durch eine geringfügige Kürzung der Receiverrohre möglich. Der Verlauf der Receiverrohre wurde angepasst, um die bestrahlte Länge der Rohre außerhalb des Turmes zu positionieren. Die Entlüftungs- und Drainageventile wurden in Zusammenarbeit zwischen DLR, MAN, HORA und PERSTA festgelegt. Die Ventile wurden so positioniert, dass sie im entleerten Zustand salzfrei sind, um eine vollständige Entleerung zu gewährleisten.

Die Sicherheitsstudie (AP 5.6) betrachtet Testreceiver und Salzkreis gemeinsam. Betriebsmodi und mögliche Störfälle wurden nach dem HAZOP-Verfahren identifiziert. Diese Arbeiten wurden bilateral von DLR und MAN durchgeführt und sind unter AP 3 genauer beschrieben.

Die Detailkonstruktion (AP 5.7) des Testreceivers wurde nach Abschluss der HAZOP-Studie gestartet. Ein 3D-Modell des Receivers (siehe Abbildung III- 12) zeigt den eigentlichen Receiver mit Sammler- und Verteilerrohren, Verbindungsbögen und Absorberrohren. Die Loslagerung des Receivers wurde mit Rollenlagern ausgeführt, um thermische Ausdehnungen zu ermöglichen und ein Verkanten der Lagerung zu verhindern. Die technische Zeichnung des Receivers wurde von MAN erstellt und durch das DLR freigegeben.



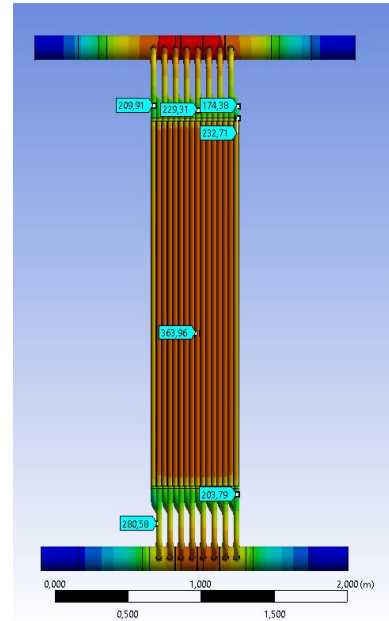
III- 12: 3D-Modell Testreceiver

Die Begleitheizung der salzführenden Rohrleitungen wurde in AP 5.8 untersucht und erfolgte mittels mineralisolierter Heizleiter. Diese Heizelemente sind Industriestandard für das Begleitheizen bei hohen Temperaturen. Die erwarteten Temperaturen wurden mithilfe eines FEM-Modells analysiert, um ein Einfrieren des Salzes zu verhindern. Auf deren Basis wurde die thermische Isolierung der Komponenten definiert. Sie ist mit mineralischen Faserdämmstoffen ausgeführt. Die Detailplanung der Begleitheizung wurde durch MAN in Zusammenarbeit mit dem DLR erstellt. Simulationen des Aufheizvorgangs zeigten, dass die Begleitheizung in mehrere Kreise aufgeteilt werden muss, um eine gleichmäßige Erwärmung zu gewährleisten.

In AP 5.9 hat man sich intensiv mit der Auslegung der Komponenten mittels CFD und FEM beschäftigt. Ein FEM-Modell des Receivers wurde erstellt, um thermische und mechanische Belastungen zu analysieren. Verschiedene Lastfälle wurden identifiziert und simuliert, um die lokalen Temperaturen und Spannungen zu berechnen. CFD-Simulationen wurden durchgeführt, um die Wärmeübergangskoeffizienten zu bestimmen.

Der Receiver muss so ausgelegt werden, dass er den thermischen und mechanischen Belastungen standhält. Bei der Auslegung der einzelnen Komponenten müssen insbesondere die thermisch induzierten Dehnungen und Spannungen berücksichtigt werden. Deshalb wurden vom DLR in enger Zusammenarbeit mit MAN zunächst alle Betriebssituationen des Receivers zusammengestellt. Diese umfassen stationäre und instationäre Lastfälle, wie den Design Point, die Notspülung und den Wolkendurchzug. Für jeden Lastfall wurden die kritischen Punkte identifiziert, an denen die höchsten Temperaturgradienten und -transienten zu erwarten sind. Als Basis für das FEM-Modell des Gesamtreceivers wurde die CAD-Geometrie von MAN genutzt. Der Receiver besteht aus den beiden Verteilerrohren, den 32 Verbindungsbögen, den 16 Absorberrohren und dem Strahlungsschutz. Die Salzströmung wurde durch Strömungsfäden modelliert, die die Wärmekapazität des Salzes abbilden. Die Absorberrohre und der Strahlungsschutz des Testreceivers werden durch das Heliostatenfeld bestrahlt. Die erwartete Strahlungsverteilung wurde mithilfe eines Strahlungsverfolgungsmodells berechnet und auf die vernetzte Geometrie des Receivers und des Strahlungsschutzes im FEM-Modell aufgeprägt. Für die strukturelle Bewertung des Testreceivers sind neben der statischen Berechnung nach ASME VIII Division 1 auch detaillierte Lebensdauerbetrachtungen durchzuführen. Dazu wurde das Vorgehen nach ASME III Division 5 HBB-T angewandt. Die thermischen Randbedingungen wurden aus den thermohydraulischen Simulationen des DLR übernommen und auf das strukturelle Modell aufgeprägt. Auf das strukturelle Modell wurden alle auftretenden Randbedingungen, wie der hydrostatische Druck, der Innendruck und äußere Lasten, wie beispielsweise Windlasten, aufgeprägt. Es wurde ein aufwändiges nicht-lineares Materialmodell verwendet, das sowohl plastische Verformungen als auch Kriechverformungen berücksichtigt.

Zur Bestimmung des Wärmeverlustes im Sammler ist es maßgeblich, den Wärmeübergangskoeffizienten vom Flüssigsalz an die Sammlerwand zu bestimmen. Mittels analytischer Ansätze gestaltet sich eine Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten schwierig und ist mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Daher wurden die benötigten Werte mittels CFD-Simulation ermittelt. Ein Teilmodell des Sammlers wurde erstellt, wobei die Zuströmung über zwei Absorberrohre erfolgt und die Abströmung aus dem Sammler wiederum über zwei Absorberrohre geschieht. Die Vernetzung im Randbereich zur Wand wurde mittels einer Prismenschicht fein aufgelöst, um genaue Ergebnisse zu erzielen. In Abhängigkeit von Massenstrom und Salztemperatur liegt der Wärmeübergangskoeffizient zwischen $5.000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und $25.000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Die Untersuchungen resultierten in einer Strategie für den Aufwärmvorgang des Receivers. Die Erwärmung erfolgt elektrisch durch die Begleitheizung und solar durch die auf den Receiver treffende gebündelte Solarstrahlung. Die Begleitheizung besteht aus Widerstandsheizern, die mäanderförmig um die begleitbeheizten Bauteile des Receivers gelegt werden. Eine transiente thermische FEM-Rechnung zeigte, dass die ursprünglich zwei Begleitheizungskreise des Receivers in vier Kreise aufgeteilt werden müssen, um eine gleichmäßige Erwärmung zu gewährleisten (vergleiche Abbildung III- 13). Zudem wurde die maximale Anzahl an Heliostate bestimmt, die zur solaren Vorwärmung der Absorberrohre verwendet werden dürfen, ohne eine Heizrate von 30 K/min zu überschreiten.



III- 13: Temperaturverteilung Testreceiver nach 7 Stunden Vorheizen

Alle Zeichnungen und Stücklisten wurden von MAN im Rahmen von AP 5.10 erstellt und in Zusammenarbeit mit dem DLR freigegeben. Schweiß- und Prüfpläne wurden ebenfalls erstellt, um die entsprechenden Qualitätsstandards bei der Fertigung des Receivers einhalten zu können. Die Fertigungsunterlagen umfassen detaillierte technische Zeichnungen und Stücklisten, die alle notwendigen Informationen für die Herstellung und Montage des Receivers enthalten.

Die Fertigung des Receivers wurde in AP 5.11 vorbereitet und durchgeführt. Ein Mockup wurde gefertigt, um Schweißbarkeit und thermischen Verzug bei den Rohreinschweißungen am Sammler zu testen. Die Fertigung umfasste das Bohren der Sammlerrohre, das Anschweißen der Weldolets und die mechanische Bearbeitung der Komponenten. Die Absorberrohre wurden vorab mit Pyromark 2500 beschichtet. Die Fertigung wurde termingerecht abgeschlossen, wobei das teilautomatische Schweißen und der Schutz der Schweißnähte durch Formiergas besondere Herausforderungen darstellten. Die Abnahme des vorgefertigten Receivers durch Lloyds Register zur Bestätigung der ASME-Konformität unter der DGRL war ein wichtiger Schritt zur Gesamtanlagenzertifizierung.

Die Montagearbeiten (AP 5.12, siehe Abbildung III- 14) umfassten die Lieferung des Receivers, den Einbau und die Platzierung des Receivers, den Anschluss an die Rohrleitungen, den Anbau von Thermoelementen sowie die Begleitheizung und Isolierung. Diese Arbeiten wurden von MAN durchgeführt und vom DLR begleitet. Die Integration in den Salzkreislauf war ein entscheidender Schritt, um die Funktionalität des Testreceivers sicherzustellen.

Die elektrischen Komponenten und die Sensorik wurden vor Ort (AP 5.13) angebracht. Die elektrische Installation umfasste die Verkabelung der Sensorik und die Integration der Begleitheizung in die Steuerung, um eine zuverlässige Überwachung des Testreceivers zu gewährleisten. Die Begleitheizung wurde getestet und das solare Vorwärmen erfolgreich durchgeführt. Nacharbeiten an den unteren Ventilen waren notwendig, um Temperaturprobleme zu beheben. Die Isolierung um die Ventile wurde verbessert, um eine ausreichende Erwärmung sicherzustellen.



III- 14: Einhub des Receivers

III.6 AP6 Qualifizierung

Im ersten Unterarbeitspaket (AP 6.1) geht es um Mess-, Steuer- und Regelungstechnik. Bevor Sensoren spezifiziert und beschafft werden können, müssen die Anforderungen bezüglich der Messgenauigkeit definiert werden. Der Receiver muss mit hoher Genauigkeit vermessen werden, um die Projektziele zu erreichen. Eine Unsicherheitsanalyse wurde durchgeführt, um den Einfluss der Messtechnik auf den Gesamtwirkungsgrad zu bestimmen. Der Receiverwirkungsgrad berechnet sich aus dem Verhältnis der an das Salz übertragenen Leistung zur solaren Incident-Leistung in der Apertur:

$$\eta_{rec} = \frac{P_{MS}}{P_{inc\ ap}} = \frac{\dot{m}_s \cdot \bar{c}_{p,MS} \cdot (T_{MS,out} - T_{MS,in})}{P_{inc\ ap}}$$

Eine Unsicherheitsanalyse zeigte, dass die Unsicherheit der Temperaturmessung bei geringen Temperaturgradienten und die Unsicherheit der eingestrahlten Solarleistung bei höheren Temperaturgradienten den größten Einfluss haben. Die Ergebnisse flossen in die Auswahl der Sensoren ein. Es wurden Anforderungen an die Messtechnik, die Ausführung und Genauigkeit von Sensoren, die Messdatenerfassung und Kalibrierung konkretisiert. Gespräche mit der Leittechnik ausführenden Firma sowie MAN und DLR fanden statt.

Zur optimierten Receiverregelung wurden in AP 6.2 DNI-Karten (Direct Normal Irradiance) aus Wolkenkameras und Schattenkameras erstellt. Diese Karten ermöglichen eine Vorhersage der DNI für die nächsten 15 Minuten. Eine Schattenkamera wurde nahe der Plataforma Solar de Almería installiert, um Wolkenschatten zu detektieren und DNI-Karten zu erstellen. Die Validierung der Daten erfolgt durch Radiometermessungen. Die Bildauswertung nutzt ein dynamisches Schwellwertverfahren und berücksichtigt die Bidirektionale Reflektionsverteilungsfunktion (BRDF) des Bodenabschnitts. Erste Validierungen zeigen Abweichungen je nach Bedingungen zwischen ± 50 und ± 300 W/m². Transiente Bedingungen, bei denen Schattenkanten über die Referenzstation wandern, haben einen besonders hohen Einfluss auf die Unsicherheiten. Die Schattendetektion bei Wolken aus den mittleren und hohen Lagen (Altostratus, Altostratus und Cirrus) mit hoher Transmission ist anspruchsvoll. Die Kamera wurde geometrisch kalibriert, wobei die Linsenverzerrung durch die innere Orientierung beschrieben und

ausgeglichen wurde. Für die Kalibrierung wurden Fotos eines Kalibrierrahmens mit Fotogrammetrietargets und die Software Aicon. Für die Erstellung des Orthogonalbilds ist zudem auch die äußere Orientierung nötig. Die Kameraposition wird dabei aus GPS-Längen- und Breitengrad sowie der TanDEM-X DEM und Montagemaß-Höhe festgesetzt. Dann werden Objekte mit bekannten 3D-Koordinaten im Foto identifiziert. Die Winkelposition wird durch ein Optimierungsverfahren bestimmt, das die Abweichung der erwarteten und erhaltenen Position der Objekte in den Orthogonalbildern minimiert.

In AP 6.3 wurde ein Messverfahren zur orts aufgelösten Messung der Oberflächentemperaturen entwickelt. Dazu sind Referenzmessungen mit einem anderen Messverfahren von hoher Bedeutung. Deshalb wurden verschiedene Methoden zur Fixierung der Thermoelemente am Rohr getestet, wobei das Laserschweißen und das Anpunkten mit Edelstahlfolie die besten Ergebnisse lieferten. Simulationen und Ofenversuche bestätigten die Eignung dieser Methoden. Die Wärmeeinflusszone, in der sich das Gefüge lokal beim Verschweißen verändert, wird vom Hersteller Lipp-Laser mit 0,05 mm angegeben und liegt somit eine Größenordnung unterhalb des Manteldurchmessers der Thermoelemente. Die Befestigungsmethoden wurden entsprechend der Kriterien „Thermische Kontaktierung“, „Einfluss ungewollte induzierte Wärmeleistung“ und „Haltbarkeit“ bewertet. Die Befestigung mittels Laserschweißen gewährleistet den geringsten metallischen Materialeinsatz und verspricht somit die geringste Verzerrung der Messergebnisse durch ungewollte induzierte Wärmeleistungen. Die bessere Eignung von angeschweißten Temperatursensoren im Vergleich zu Angepunkteten konnte durch praktische Messungen bestätigt werden.

In AP 6.4 wurde ein Korrosions-Teststand entwickelt, um die Korrosion von Werkstoffen in Salzsämelzen bei hohen Temperaturen zu untersuchen. Der Teststand umfasst einen Aufschmelzbehälter und einen Korrosionsversuchsbehälter mit Rührer und Probenhalterung. Verschiedene Werkstoffe (310N, 347, Alloy 800, Haynes 230 und Alloy 625) sollten über längere Zeiträume getestet werden, um ihre Korrosionsbeständigkeit zu bewerten und geeignete Receivermaterialien identifizieren zu können. Besondere Herausforderungen bei der Entwicklung des Teststandes waren die Biegefestigkeit der Rührerwelle, die Halterung und Abdichtung der Rührerwelle sowie die Kühlung der Rührerwelle. Auch der Materialauswahl für den Behälter kam eine besondere Bedeutung zu, da diese dauerhaft dem korrosiven Medium ausgesetzt ist. Letztendlich wurden sie aus dem Nickelbasiswerkstoff Alloy 617 gefertigt, der bereits im Engineering für den Flüssigsalzkreislauf ausgewählt wurde. Am Ende der Entwicklung lagen ein Prozessfließbild, Konstruktionszeichnungen und die notwendigen Sicherheitsdokumente vor. Der fertig aufgebaute Korrosionsprüfstand wurde erfolgreich getestet. Die kritischen Elemente, wie die Rührerwelle, die Überlagerung mit Sauerstoff und das Umdrücken des Salzes zwischen den Behältern, konnten erfolgreich getestet werden.

Die Korrosionsuntersuchungen wurden im Korrosionsprüfstand durchgeführt (AP 6.5), wobei die Proben verschiedenen Betriebszuständen ausgesetzt wurden. Der Betrieb des Korrosionsprüfstands kann in zwei Hauptbetriebszustände unterteilt werden: Heißbetrieb und Kaltbetrieb. Während des Heißbetriebs sind die Proben dem $600\text{ °C} \pm 10\text{ K}$ warmen Solarsalz ausgesetzt, wohingegen im Kaltbetrieb die Proben aktiv mit Stickstoff auf mindestens 235 °C gekühlt werden. Jeder Werkstoff wurde für drei verschiedene Expositionsdauern (50, 100 und 200 Zyklen bzw. 750, 1500 und 3000 Stunden) beprobt. Es wurden regelmäßig Salzproben entnommen, die beim DLR in Stuttgart analysiert wurden. Durch eine Überlagerung mit reinem Sauerstoff konnte die fortlaufende Salzzersetzung minimiert werden. Die Metallproben der verschiedenen Werkstoffe wurden im Nachgang verschiedenen Untersuchungen unterzogen. Die Kerbschlagzähigkeit nahm bei allen Werkstoffen durch Exposition im Salzbereich ab. Dies ist ein Hinweis auf Materialversprödung, welcher in den Zugversuchen bestätigt wurde. Die einzelnen Werkstoffe verhalten sich dabei sehr unterschiedlich. Die Edelstähle erscheinen ähnlich geeignet, wie die Nickelbasislegierungen. Die Bestimmung des Metallverlustes erfolgte

durch Ablösen der Oxidschicht nach DIN EN ISO 8407:2021. Die chemische Reinigung wurde bei Bedarf durch mechanische Verfahren ergänzt und in mehreren Schritten wiederholt. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass der Materialverlust unter zyklischen und isothermen Bedingungen in einer ähnlichen Größenordnung liegt, allerdings war der Materialverlust im Salzbereich etwas höher als im Gasbereich über der Salzscherme. Der Materialverlust nach 3000 Stunden in der Salzscherme bei zyklischer Exposition zwischen 235 °C und 600 °C liegt bei folgenden Werten: 310N (9 µm) < 347 (12 µm) < Alloy 625 (12 µm) < Alloy 800 (15 µm) < Haynes 230 (23 µm). Die Edelstähle schneiden somit tendenziell besser ab, als die Nickelbasislegierungen. Die Vermessung der Oxidschichtdicke unter dem Lichtmikroskop zeigt, dass diese nach zyklischer Versuchsführung dicker ist, als nach isothermer. Geringfügige Unterschiede sind auch zwischen Gas- und Salzbereich erkennbar (vergleiche Tabelle 3). Die Oxidschichtdicke der Proben aus dem Salzbereich bei zyklischer Versuchsführung sind nachfolgend aufsteigend angeordnet: Alloy 625 < 310N < 347 < Haynes 230 < Alloy 800. Somit ist auch die ausgebildete Oxidschichtdicke nicht generell bei den Nickelbasislegierungen geringer als bei den Edelstählen.

Tabelle 3: Oxidschichtdicke für die getesteten Materialien für isotherme und zyklische Versuchsführung nach jeweils 3000 h in 600 °C heißer Salzscherme.

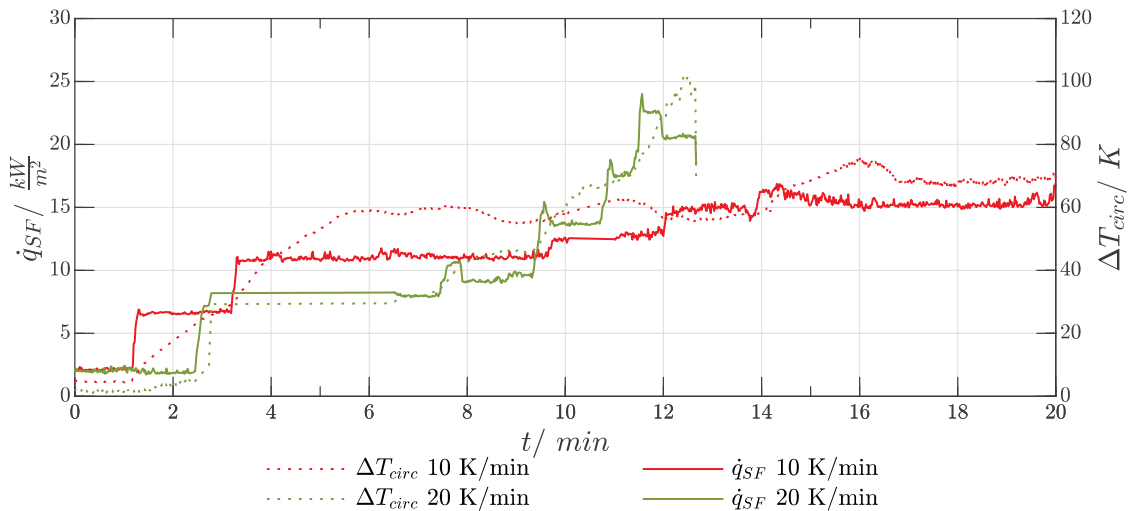
Oxidschichtdicke in µm		310N	347(H) ¹⁾	Alloy 800	Haynes 230	Alloy 625
Gas	isotherm	6 [3;16]	10 [9;13]	12 [11;15]	---	7 [5;9]
	zyklisch	17 [14;21]	20 [17;25]	30 [24;36]	22 [19;26]	13 [11;16]
Salz	isotherm	4 [2;7]	11 [9;14]	17 [14;26]	---	9 [7;11]
	zyklisch	20 [17;23]	26 [21;32]	28 [23;35]	27 [25;31]	18 [16;20]
1) Isotherm 347H, zyklisch 347						

Die Arbeiten zur Weiterentwicklung der Flussdichtemessung (AP 6.6) bauen auf den Ergebnissen aus AP 2.3 auf und sind in dem dazugehörigen Abschnitt zu „kamerabasierten Messverfahren“ beschrieben.

III.7 AP 7 Versuchsdurchführung Testreceiver

Solares Vorwärmen: Zur Inbetriebnahme des Salz-Kreislaufs mit Receiver (AP7.1) ist die solare Vorwärmung der Receiverrohre notwendig. Bei der Durchführung der Vorwärmung müssen bestimmte Bedingungen eingehalten werden, um den Receiver zu schützen. Die Temperaturen der Vorder- und Rückseite der Rohre dürfen eine maximale Temperaturdifferenz von 70 K nicht überschreiten. Außerdem darf die Heizrate 30 K/min nicht überschreiten, damit die Beschichtung der Rohre beständig bleibt. Zudem dürfen die Gradienten pro Rohr nicht zu hoch werden, sodass eine homogene Temperaturverteilung angestrebt wird. Diese Bedingungen wurden in einer Formel zur Berechnung des notwendigen und zulässigen Bedarfs an Heliostaten implementiert. Die Berechnung berücksichtigt zudem die Jahreszeit, Position und Zielgenauigkeit der Heliostaten. Das Ergebnis der Berechnung ist die maximal zulässige Anzahl an Heliostaten, die auf den Receiver fokussiert werden dürfen. Diese Begrenzung wurde in das Heliostatfeldsteuerungsprogramm HeliOS des DLR implementiert und im Zuge der Inbetriebnahme sowie der weiteren Versuche erfolgreich getestet und weiterentwickelt.

Die Versuche der solaren Vorwärmung haben gezeigt, dass Heizraten von 15 K/min nicht überschritten werden dürfen, damit die Temperaturgradienten der Vorder- und Rückseite nicht über 70 K steigen. Abbildung III- 15 zeigt die gemessenen Temperaturgradienten bei Aufheizraten von 10 K/min und 20 K/min sowie die maximale Flussdichte in kW/m² (gemessen über die Radiometer im Strahlungsschutz).



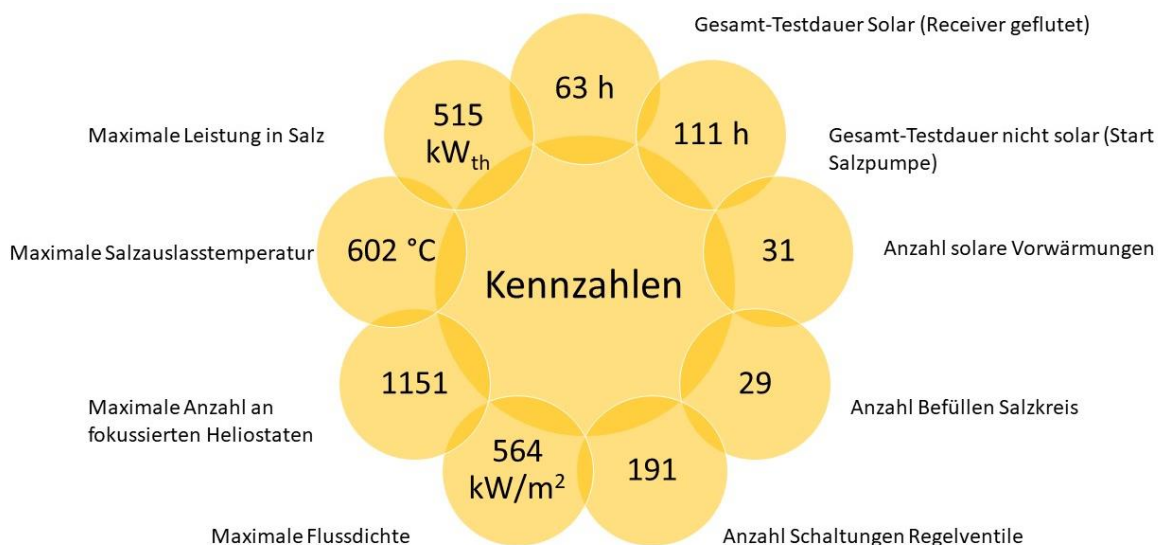
III- 15: Temperaturdifferenz der Rohrvorder- und Rückseite sowie Flussdichte auf dem Receiver bei verschiedenen Heizraten

Die Abbildung III- 15 verdeutlicht nochmals, dass bei einer Heizrate von 20 K/min die Temperaturdifferenz von 70 K überschritten werden. Außerdem lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Flussdichte und Temperaturdifferenz erkennen. Bei einer Erhöhung der Flussdichte von über 15 kW/m² steigt die Temperaturdifferenz ebenfalls über 70 K. Diese Erkenntnisse wurden als limitierende Faktoren in die Vorwärmroutine implementiert.

Wasser IBN: Vor der solaren Inbetriebnahme mit Salz wurde die gesamte Anlage in einer Wasserfahrt getestet. Hierzu wurde Wasser in den Salztank gefüllt. Der gesamte Salzkreislauf sowie die Steuerung der Anlage konnten so getestet werden. Es wurden alle Betriebszustände durchlaufen und die Anlage gefahren. Hierbei konnte auch das Betriebspersonal eingearbeitet werden. Nach der erfolgreichen IBN mit Wasser wurde die Anlage mit Hilfe der Begleitheizungen und der solaren Vorwärmung getrocknet und mit Salz befüllt.

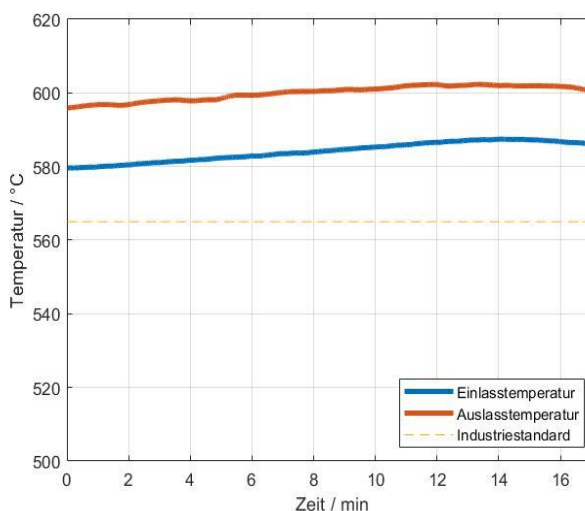
Abnahme: Zum Test der Sicherheitskette im Solarbetrieb (AP 7.1) durch den TÜV wurde die Anlage in den Solarbetrieb gefahren und der Receiver mit Salz durchflutet. Im Anschluss wurde ein Grenzwert absichtlich verletzt, indem der Massenstrom zu gering eingestellt wurde, damit die Sicherheitskette auslöst. Dies bedeutet, dass der Receiver zunächst weiter mit Salz durchströmt wird. In dieser Zeit können die Heliostaten defokussiert werden und die gesamte Leistung vom Receiver genommen werden. Das Durchlaufen der Sicherheitskette hat gezeigt, dass die Heliostate innerhalb der geforderten Zeit das Signal zum Defokussieren erhalten haben und das Wegfahren selbst nur ein Prozess von wenigen Sekunden ist. Im Nachgang wird der gesamte Salzkreislauf drainiert und die Anlage fährt automatisch in einen sicheren Betriebspunkt. Würde man die Anlage hieraus wieder starten wollen, müssten erst wieder einige Schrittketten durchlaufen und Sicherheitsaspekte betrachtet werden, sodass die Anlage gegen zu schnelles Wiederauffahren geschützt ist. Somit konnte die Sicherheitskette erfolgreich abgenommen werden.

Anlagenkennzahlen: Im Zuge der Versuchsdurchführungen (AP 7.2) wurde die Salzanlage in verschiedene Betriebszustände gebracht und alle Komponenten beansprucht. In Abbildung III-16 ist dargestellt welche Kennzahlen die Anlage während dieser Zeit erreicht hat.



III- 16: Kennzahlen der gesamten Versuchsdurchführung

Das Erreichen der Salzaustrittstemperatur von 602°C ist ein wichtiger Meilenstein des Projektes. Der Industriestandard von Salzsammelzeanagen liegt bei 565°C . Die Versuchsanlage in Jülich ist aber in der Lage Temperaturen von bis zu 600°C zu erzielen. Die Anlage kann mit synthetischer Luft überlagert werden, wodurch die Zersetzung des Salzes im Vergleich zu einem Betrieb an normaler Umgebungsluft unterdrückt wird. Zur Erzielung der 600°C -Auslasstemperatur wurde die gesamte Salzanlage solar aufgeheizt. Der Rohrreceiver kann nur bis maximal 300°C vorgewärmt werden, wodurch die Salzstarttemperatur für einen Testtag bei maximal 350°C liegt. Das gesamte Salzinventar wurde an einem Testtag solar aufgeheizt bis Salzeintrittstemperaturen von 580°C und Salzaustrittstemperaturen von 602°C erreicht wurden. Insgesamt wurde die Anlage für 3 Stunden oberhalb des Industriestandards von 565°C betrieben.

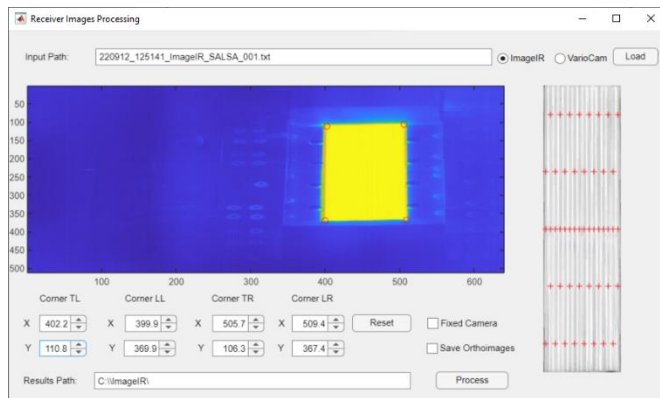


III- 17: Temperaturen der Anlage im Lastbetrieb bei über 600°C

Salzleckagen: Nach der Inbetriebnahme der Anlage in 2022 kam es 2023 im Zuge der Versuchsdurchführung zu einer Salzleckage an den Receiverventilen. Die Ventile sind durch eine Überhitzung undicht geworden und Salz konnte austreten. 2024 wurde der Pumpenflansch bei der Wiederinbetriebnahme undicht und es kam zu einer weiteren Leckage am Salztank. Die Beseitigung des Salzes und die Reparaturen führten zu einem hohen Zeit- und Kostenaufwand. Aus den Leckagen konnten aber Verbesserungen für zukünftige Anlagen erarbeitet werden.

- Ventile, Flansche und Schweißnähte zeigen eine erhöhte Anfälligkeit für Leckagen. Hier sind abnehmbare Isolierungsmanschetten für eine gute Zugänglichkeit hilfreich. Außerdem sollte eine Ablaufmöglichkeit für Salz geschaffen werden. Es sollte ausreichend Platz unter Ventilen und Flanschen vorhanden sein.
- Die Beheizung der Ventile ist nicht parallel zu der Beheizung von Rohren möglich. Die Ventilkörper sollten einzeln beheizt werden, ggf. durch eigene Heizmanschetten.
- Die Begleitheizungen sollten in einzelnen kleineren Kreisen ausgeführt werden, so dass diese bei einem Defekt oder einer Versprödung einfacher zu tauschen oder zu ersetzen sind.
- Die Ventile müssen vor einem Testtag mehrfach geschaltet werden, da Stillstandzeiten zu einer Blockade führen können.

Auswerteroutine: Zur Vorbereitung der Auswertung der Versuche (AP 7.3) wurde eine automatisierte Auswerteroutine erstellt, die alle ermittelten Messdaten der unterschiedlichen Systeme (Heliostatsteuerung, DNI-Messung, Anlagenmessstellen usw.) vereint. Durch die Auswerteroutine entsteht schnell eine Übersicht des Versuchs und der erreichten Parameter, so dass der nächste Versuch von der Auswertung profitieren kann.



III- 18. Programm zur Verarbeitung von Infrarot-Bildern des Rohrreceivers mit identifizierten Receiver-ecken (rote Kreise) und Position der Thermoelemente (rote Kreuze)

IR-Datenauswertung: Die Auswertung der Infrarotdaten ist für die Auswertung der Versuche besonders wichtig. Die Temperaturen der Vorderseite der Receiverrohre sind für verschiedene Auswertungen existenziell. Die Temperaturen werden zum Optimieren des solaren Vorwärmens und Einhalten der erlaubten Temperaturgradienten benötigt sowie zur Ermittlung und Berechnung der Wirkungsgrade der Anlage. Die Temperatur der Rückseite der Rohre wird über Thermoelemente gemessen. Um die Temperaturen der Vorderseite der Rohre an genau den gleichen Positionen zu erhalten, wurde ein Skript erstellt. Das Skript er-

kennt den Receiverumriss und die einzelnen Rohre aus den Bilddateien, wodurch Windeinflüsse (Kamerawackeln) eliminiert werden und die Temperaturen der Vorder- und Rückseite verglichen werden können (siehe Abbildung III- 18).

Wirkungsgrade: Die kontinuierliche Power-on-Methode und die semi-analytische Methode wurden zur Ermittlung der Receivereffizienz entwickelt und mit Hilfe von Messdaten analysiert. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Methoden ist das Verfahren zur Berechnung der thermischen Verluste des Empfängers. Der Wirkungsgrad des Receivers ist definiert als das Verhältnis zwischen der von der Salzschnmelze absorbierten Leistung und der auf den Empfänger einfallenden Sonnenenergie.

$$\eta_{rec} = \frac{P_{MS}}{P_{inc}} = \frac{P_{MS}}{P_{MS} + P_{loss,th}} = \frac{\alpha_s}{1 + \frac{P_{loss,th}}{P_{MS}}}$$

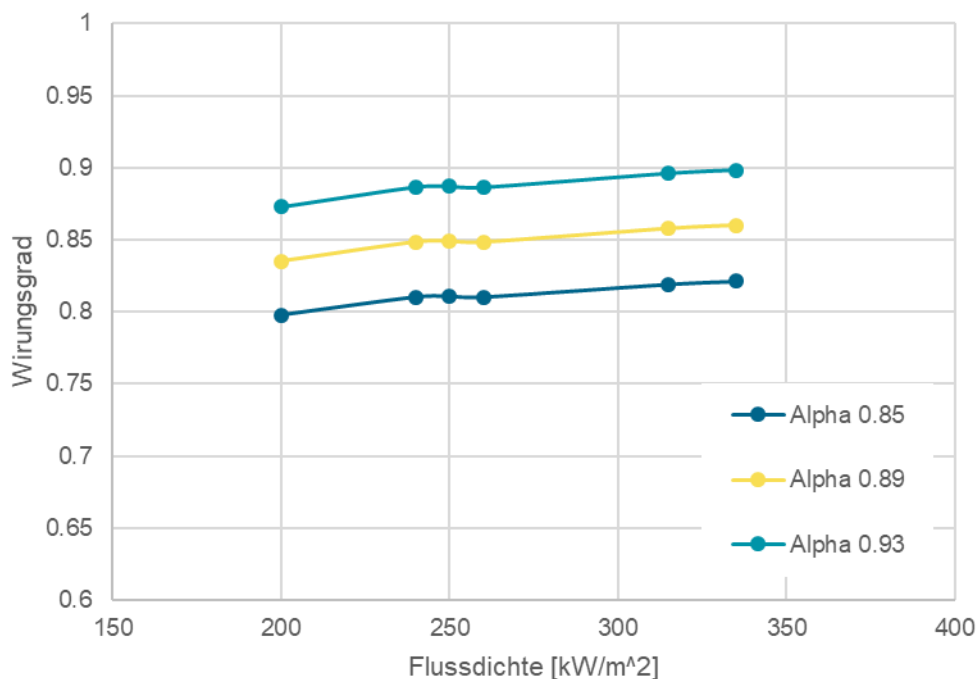
wobei $P_{MS} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})$ die von der Salzschnmelze absorbierte Leistung, $P_{loss,th}$ die thermischen Verluste des Empfängers und α_s der halbkugelförmige Absorptionsgrad über das Sonnenspektrum der Röhren.

Continuous Power-On-Methode (CPOM): Die kontinuierliche Power-on-Methode berechnet die thermischen Verluste aus der gemessenen von der Salzschnmelze absorbierten Leistung für verschiedene gemessene Einstrahlungsleistungen auf den Receiver. Dabei wird angenommen, dass die thermischen Verluste unabhängig von der einfallenden Leistung sind, wenn die Temperatur der Salzschnmelze konstant gehalten wird. Es werden verschiedenen Leistungsstufen mit konstanten Ein- und Auslasstemperaturen angefahren. Daraus werden Paare aus hohen und niedrigen Einstrahlungsleistungen gebildet, basierend auf den Messungen mit den 8 Radiometern. Diese Messdaten gehen in die Formel für die thermischen Verluste ein.

$$P_{loss,th} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{MS,H_i} - \sum_{i=1}^n (P_{MS,L_i} \cdot R_i)}{(\sum_{i=1}^n R_i) - n} \quad R_i = \frac{P_{inc,H_i}}{P_{inc,L_i}}$$

Die so berechneten thermischen Verluste werden in die Wirkungsgradgleichung eingesetzt. Die vorläufigen Wirkungsgrade liegen zwischen 79% und 89% basierend auf 3 Messpaaren. Da der Absorptionskoeffizient noch nicht genau bekannt ist, wurden Werte zwischen 0,85 und 0,93 angenommen. Die Unterschiede im Wirkungsgrad ergeben ca. 4% wie Abbildung III- 19 zeigt.

Wirkungsgrad CPOM



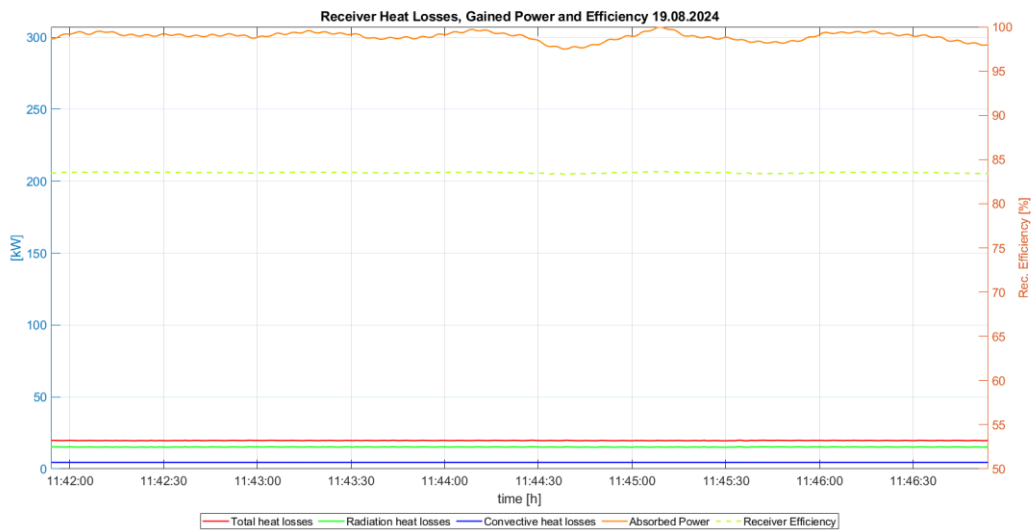
III- 19: ermittelte Wirkungsgrade über die CPOM bei unterschiedlichen Alpha-Werten

Semi-analytische Methode: Bei der semi-analytischen Methode werden die Wärmeverluste als Summe der Konvektions- und Strahlungsverluste berechnet. Zur Berechnung der Verluste mit Hilfe der Gesetze von Stefan-Boltzmann und Newton werden die Temperaturverteilung über der Empfängeröffnung mit einer IR-Kamera und die Windgeschwindigkeit in Empfängerhöhe und die Umgebungstemperatur über Sensoren gemessen.

$$P_{loss,th} = \sum_j^{n_{pixels}} \left(\varepsilon \sigma (T_{s,j}^4 - T_{\infty}^4) + h (T_{s,j} - T_{\infty}) \right) A_p$$

Die Wärmeverluste berechnen sich nach der oben stehenden Formel, wobei ε der hemisphärische Emissionsgrad über das jeweilige IR-Spektrum der Röhrenoberfläche ist, A_p die Frontfläche (projizierte Fläche in vertikaler Richtung) jedes von der IR-Kamera gesehenen Pixels ist, h ist der externe konvektive Wärmeübertragungskoeffizient von der Außenfläche der Röhren an die Umgebungsluft, $T_{s,j}$ ist die externe Röhrenoberflächentemperatur für jedes Pixel der IR-Kamera, und T_{∞} ist die Umgebungstemperatur. Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Summe über alle Oberflächensegmente A_p der tatsächlichen Öffnungsfläche des Empfängers entsprechen muss, außerdem kann die Infrarotkamera einige Regionen nicht erfassen Sobald die thermischen Verluste des Empfängers bekannt sind, wird der Wirkungsgrad mit Gleichung 1 berechnet.

Der hemisphärische Emissionsgrad wurde durch Messung der Oberflächentemperatur der Receiverrohre mit der Infrarotkamera sowie der Rückwandtemperatur des Receivers mit Thermoelementen bestimmt. Durch den Vergleich dieser beiden Messungen wurde der Emissionsgrad während einer kurzen Betriebszeit ermittelt, in der der Salzmassenstrom hoch gehalten wurde und die Heliostaten vom Receiver defokussiert waren. Der Durchschnittswert des Emissionsgrads, der während mehrerer Kalibrierungsschritte ermittelt wurde, betrug 0,89. Da der Emissionsgrad temperatur- und richtungsabhängig ist, wird eine Messkampagne im Ofen folgen, um diesen genau zu ermitteln. Die Berechnung des Wirkungsgrads erfolgte mit der semi-analytischen Methode für die gleichen Messzeiträume wie mit der CPOM. Somit können die Ergebnisse der beiden Methoden miteinander verglichen werden.

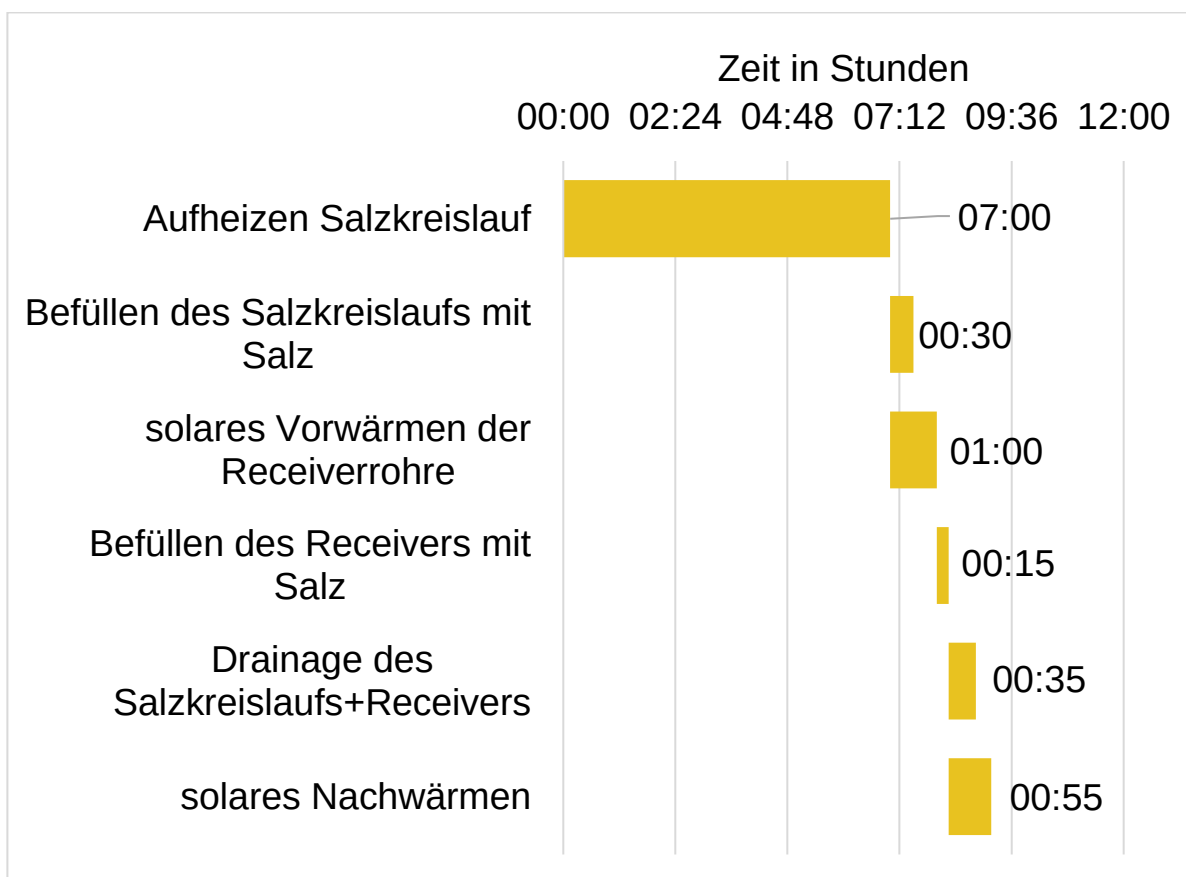


III- 20: ermittelter Wirkungsgrad über die semi-analytische Methode für einen Beispielzeitraum

Die gesamte Testanlage wird im Folgeprojekt STERN weiterverwendet. Aus diesem Grund findet keine Demontage und Zerlegung des Testreceivers und Salzkreislaufs (AP 7.4) statt. Somit bleibt der Aufbau des Salzkreislaufs im Multifokusturm des DLR bestehen, sodass weitere Versuche mit der Anlage durchgeführt werden können.

Zur Identifizierung von Zeitersparnissen und Optimierungen (AP 7.5) ist es notwendig den Ablauf eines typischen Versuchstages zu erfassen. Ein typischer Versuchstag und die Dauer der

einzelnen Arbeitsschritte ist in Abbildung III- 21 dargestellt. Der Salzkreislauf der Anlage wird für die Versuche über die Begleitheizungen auf über 350°C vorgeheizt. Der Rückkühler muss ebenfalls aufgewärmt werden, damit im Betrieb das heiße Salz durchströmen und dabei abgekühlt werden kann, ohne einzufrieren. Das Aufheizen des Salzkreislaufs und Kühlers dauert ca. 7 Stunden und wird am Vortag gestartet. Am Versuchstag selbst wird der Salzkreislauf über die Anlagensteuerung mit Salz befüllt. Hierfür wird zunächst die Pumpe gestartet und anschließend das Salz im Receiverbypass gepumpt. In der Anlagensteuerung werden hierfür mehrere Schrittketten durchlaufen, sodass der Gesamtprozess ca. 30 Minuten dauert. Zum anschließenden Receiverfluten (Durchströmen des Receivers mit Salz) müssen die Receiverrohre vorgewärmt werden. Das solare Vorwärmen des Receivers kann parallel zu dem Befüllen des Salzkreislaufs stattfinden. Das Vorwärmen dauert 1 Stunde. Sobald die Receiverrohre über 300°C aufgewärmt sind, kann der Receiver mit Salz durchströmt werden. Hierzu werden verschiedene Schrittketten in der Steuerung der Anlage durchlaufen. Der Prozess dauert ca. 15 Minuten. Nachdem der Receiver geflutet ist, läuft das Salz vom Salztank über den Einlass-tank im Serpentinestrom durch den Receiver und zurück über den Auslasstank in den Salztank. In diesem Zustand ist die Anlage bereit für die Bestrahlung mit hohen Flusssichten. Insgesamt dauert die Vorbereitung der Anlage bis zu diesem Zustand 1 Stunde und 15 Minuten. Nach der Versuchsdurchführung muss die Anlage heruntergefahren werden. Hierzu wird die Drainage des Receivers und Salzkreislaufs gestartet. Diese Schrittkette hat eine Durchlaufzeit von ca. 35 Minuten. Im Anschluss wird der Receiver mit Hilfe der Solarstrahlung und Helios-taten solar nachgewärmt. Dies ist erforderlich, um die zulässigen Temperaturgradienten auch beim Abkühlen des Receivers nicht zu überschreiten. Des Weiteren kann so sichergestellt werden, dass das Salz in den Receiverrohren vollständig abfließt. Der Prozess des Nachwärmens und Abkühlens der Receiverrohre dauert ca. 1 Stunde.



III- 21: Dauer der einzelnen Vorgänge eines typischen Versuchstags

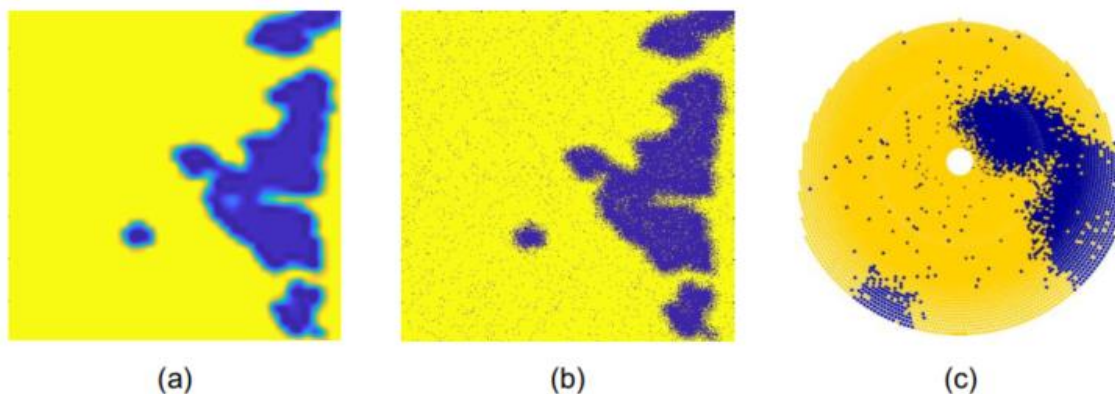
Zeitersparnisse und somit Optimierungen können im Bereich des solaren Vorwärmens erzielt werden. Bei einer konstanten Heizrate von 10 K/min und einem direkten Heizen mit dieser Heizrate kann der Prozess des solaren Vorwärmens auf ca. 25 Minuten reduziert werden. Der Lastbetrieb kann ebenfalls schneller erreicht werden, wenn die Befüllung des Bypasses und die solare Vorwärmung parallel stattfinden. Die Drainage des Gesamtkreislaufs und das solare Nachwärmen finden aktuell noch nicht parallel statt, da ein Fehler in der Steuerung dies verhindert. Bei einem Parallelbetrieb kann zudem eine Zeitersparnis erzielt werden. Somit ergibt sich eine mögliche gesamte Ersparnis von über 1 Stunde. Diese Ansätze werden im Projekt STERN weiterverfolgt.

III.8 AP8 Weiterentwicklung Simulationsmodelle

Im AP8.1 wurde der Receiver mit Dymola simuliert, wichtig war hierbei, dass die kurzen Absorberrohrängen dafür sorgen, dass die Einzeldruckverluste durch Krümmer, Ein- und Ausstritte gegenüber den Rohrreibungsverlusten an Signifikanz gewinnen. Die Einzeldruckverluste werden daher nun in den Rohrbündeln berücksichtigt.

Es wurden außerdem numerische Analysen von Nowcasting-Daten durchgeführt und mit entsprechenden DNI-Karten Zeitreihen erstellt und eine Matlab-Schnittstelle implementiert. So konnten Raytracing-Simulationen mit der Software STRAL auf Basis dieser DNI-Karten durchgeführt werden. Für jeden Heliostaten wurde entweder der Clearsky-DNI-Wert oder komplette Verschattung gegeben. Auf diese Weise wurde die reale Verschattung abgebildet.

Des Weiteren sind Prädiktionspixel mit einer Auflösung von maximal 370m nötig gewesen, damit die Standardabweichung des Prädiktionsfehlers unterhalb von 1 % bleibt. Dies wird mit einem wolkenkamerabasierten Nowcasting System erreicht.



III- 22: Beispielhafte Darstellung einer DNI-Karte (a), wie sie vom Nowcasting generiert wird, der daraus abgeleiteten randomisierten Clearsky-DNI-Karte (b) und der entsprechenden Heliostatfeld Verschattungs-matrix

In AP 8.2 lag der Fokus auf der Erstellung eines Lebensdauermodells für den Receiver. Es wurden DNI Datensätze für zwei Exemplarische Solarstandorte „Jülich, Deutschland“ und „Redstone, Südafrika“ erstellt. Ebenso wurde ein sogenanntes Lastkollektiv erstellt. Dies gibt Randbedingung wie Lastzyklen vor. Diese werden für die thermischen und strukturmechanischen Simulationen, bei denen auftretende Temperaturen, Dehnungen und Spannungen berechnet werden, benötigt.

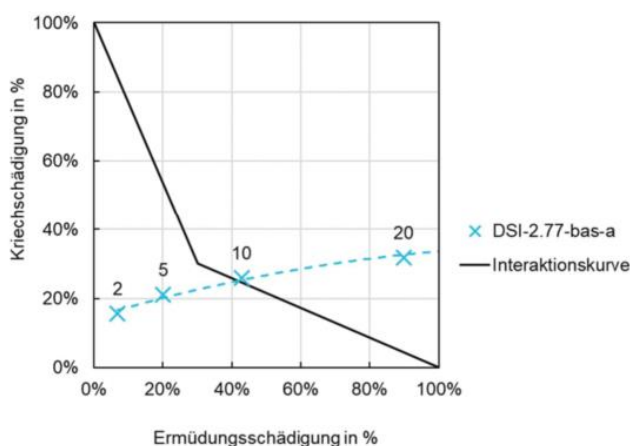
Die Gesamtschädigung aus Kriech- und Ermüdungsschäden wurde nach ASME Nuklear Code berechnet, welches sehr konservative Ergebnisse liefert. Zudem wurde herausgefunden, dass

die recht aufwändigen abschnittsweise definierten Polynomfunktionen, wesentlich die Unsicherheiten verringern. Die Ergebnisse rechtfertigen den Mehraufwand für dieses aufwendige Verfahren.

Gespräche mit Experten zur Auslegung empfahlen die Verwendung ASME Section VIII Division 1, während die Lebensdauerbetrachtung nach ASME Section III Division 5 durchgeführt werden kann. Die Verwendung von ASME Section I ist ebenfalls möglich.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Norm ist, dass es im Gegensatz zu Section VIII Division 1 keine Festlegung bezüglich einer Mindestwandstärke (1,5 mm + Fertigungs- und Korrosionszuschlagsfaktoren) gibt. Für die Ermüdungsberechnung, insbesondere der Header, kann außer ASME Section III auch die DIN EN 12952 herangezogen werden.

Mit diesen Ergebnissen wurde ein Tool zum Postprocessing von Receiverberechnungen mittels FEM erarbeitet, dass eine schnellere Auswertung der Kriech- und Ermüdungsschädigung möglich macht. Ebenso erstellt es eine Interaktionskurve, die der Berechnung der erwarteten Lebensdauer in Jahren dient.

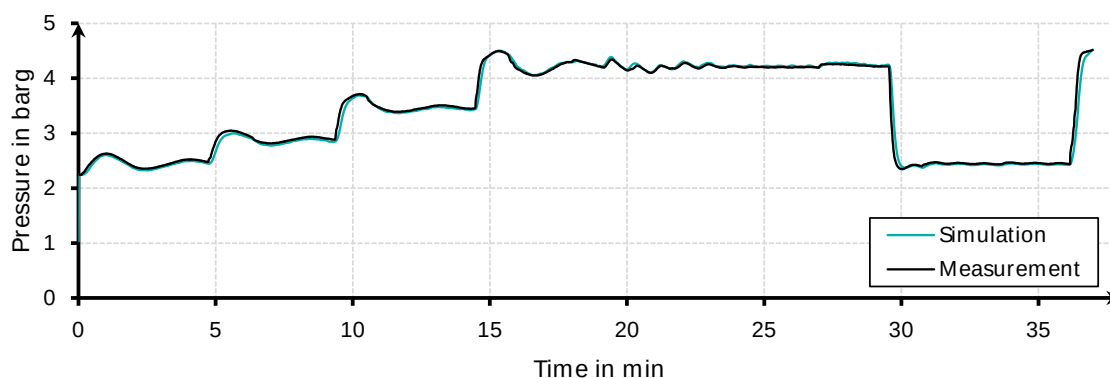


III- 23: Zeitlicher Verlauf der Schädigungsanteile an einem exemplarischen Lastfall

Dieses Tool ermöglicht auch eine großflächige Bewertung von Bauteilen. Es wurde deutlich, dass die größte Ermüdungsschädigung auf der Rohraußenseite, die größte Kriechschädigung hingegen auf der Rohrrinnenseite berechnet wird. Insgesamt versagt die der solaren Strahlung zugewandten Seite des Rohres erwartungsgemäß als erstes, wohingegen auf der Rückseite des Rohres vergleichsweise hohe Lebensdauern berechnet werden.

In AP8.3 wurden die Druckverluste im Inneren des Receivers untersucht und das dynamische Receivermodell validiert. Dazu wurde der Druckverlustbeiwert des Receivers durch den Nelder-Mead-Algorithmus so angepasst, dass das Modell den gemessenen Druckverlust exakt getroffen hat.

Abbildung III- 24 zeigt einen Vergleich der durch den Optimierungsalgorithmus gegenübergestellten Größen in variierenden dynamischen Betriebszuständen. Auch transiente Schwankungen werden zeitlich unmittelbar und korrekt abgebildet. Allerdings nur bei einer Fahrt mit Wasser als Medium, da im Betrieb mit Salz aufgrund technischer Schwierigkeiten nicht auf die Differenzdrucksensoren zugegriffen werden konnte.



III- 24: Vergleich von simulierten mit gemessenen Receiverinlassdruck

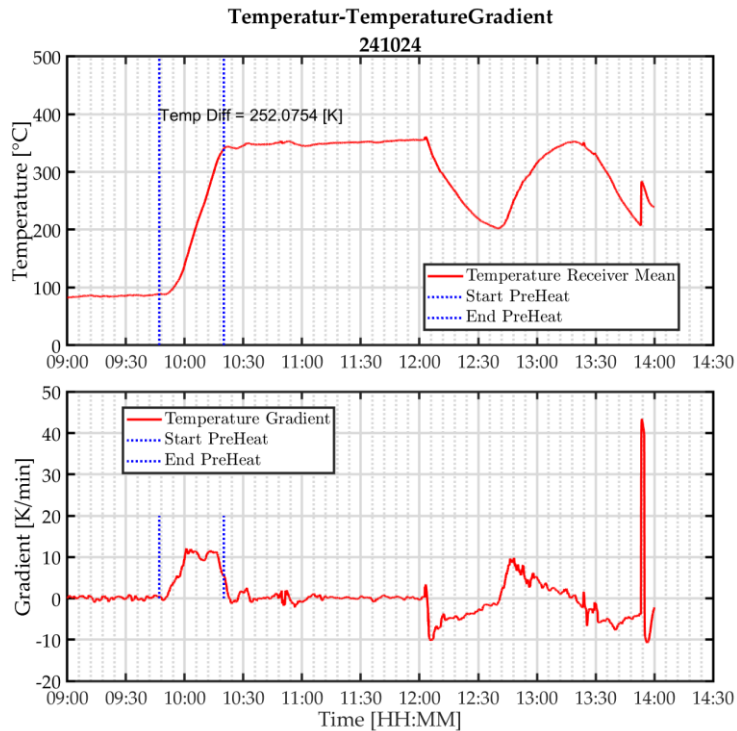
Zur hydraulischen Validierung des Receivermodells im Salzbetrieb wurde als Ausgangspunkt für die Anpassung der Modellparameter das Ergebnis der Validierung mit Wasser genutzt.

Mit dem angenommen Druckverlustbeiwert von 3,75 pro Panel, der im Betrieb mit Wasser ermittelt wurde, traten erhebliche Abweichungen des Druckabfalls über den Receiver mit Salz auf. Dieser Fall bestand weiter auch mit hydraulisch glatten Rohren, wodurch im Ausschlussprinzip, Zweifel an der Verlässlichkeit der Differenzdruckmessung aufkamen.

Bei der thermischen Validierung des Receivermodells war auffällig, dass das Modell bei der Auslasstemperatur der realen Anlage in einigen Fällen in transienten Zuständen zeitlich vorläuft (bis zu 10 s). In anderen Fällen schwang es mit den Versuchsdaten in Phase. Nach eingehender aber noch nicht abschließender Analyse scheint die Ursache zumindest zum Teil in einem numerisch beschleunigten Wärmetransport von der Rohraußen auf die Rohrinneenseite zu liegen, was durch kleinere Modellanpassungen sehr gut kompensiert werden konnte. Verschiedene Gründe im Bereich der Diskretisierung, einer möglichen Oxidschicht auf Rohren, die isolierende Wirkung hat oder Unklarheiten bzgl. der Receiveroberflächentemperaturen könnten zu der Verzögerung führen. Die Gründe konnten nicht final ermittelt werden, wobei die Effekte durch Modellanpassungen jedoch gut im Modell kompensiert wurden. Es lassen sich also sehr gute Simulationsergebnisse erzielen und exakte statischen und dynamischen Vorhersagen treffen.

In AP 8.4 wurde eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht, die transienten Einflüsse auf den Ertrag zu analysieren und sie für Jahresertrags-Tools zu nutzen. Transiente Einflüsse, wie etwa der Wolkendurchzug, können in den gegenwärtigen Jahresertrags-Tools nicht simuliert und berücksichtigt werden, da die erforderlichen Inputs für derartige Simulationen nicht zur Verfügung stehen. Das Ziel besteht darin, solche Tools um einfache Parameter für die transienten Einflüsse zu erweitern. Zu diesem Zweck ist eine Analyse realer Betriebsdaten sowie die Ableitung entsprechender Parameter erforderlich.

Ein Beispiel für eine solche Analyse ist in Abbildung III- 25 dargestellt, welche die solare Vorwärmung des Test-Receivers in Jülich in den blauen Bereichen veranschaulicht. Hierbei wurde der Receiver durch einen vorgegebenen Temperaturgradienten auf den Sollwert für das solare Vorwärmen aufgeheizt. Die Methodik einer Analyse solcher Effekte für Jahresertrags-Tools besteht in der Verwendung eines Referenz-Modells, welches auf dem aktuellen Stand der Tools basiert. Dieses Modell berechnet parallel die solare Vorwärme und wird anschließend als Vergleich zu den realen Betriebsdaten genutzt. Die Methodik wurde im Rahmen des Projektes entwickelt und für ausgewählte Tage analysiert.



III- 25: Darstellung Versuchs-Ablauf am 24.10.2024. Obere Grafik: Temperatur-Verlauf in Rot. Untere Grafik: Temperatur-Gradient-Verlauf in Rot. Start und End-Zeitpunkt für das solare Vorwärmen in Blau

Für den in der Abbildung dargestellten Beispieltag kann eine Analyse durchgeführt werden, bei der die real benötigte Energie (Testreceiver) mit der ideal benötigten Energie (Referenzmodell) verglichen wird. Daraus wird ein Parameter abgeleitet. Das solare Vorwärmen war an diesem Tag unter guten Einstrahlungsbedingungen. Die Auswertung ergibt einen Faktor von 1,3, der den Unterschied zwischen dem realen System und dem Simulationsmodell beschreibt. In diesem Faktor finden Einstrahlungs- und Regelungsbedingungen Berücksichtigung. Der ermittelte Faktor kann in den Jahresertrags-Tools verwendet werden, um die Simulationen näher an das reale Verhalten anzupassen.

III.9 AP9 Commercial Design: High Performance Molten Salt Receiver Panel

Nach Fertigung und Installation des Testreceivers fand ein Review (AP 9.1) als Präsenzmeeting am Standort Deggendorf statt und umfasste ein abteilungsübergreifendes Team das aus den Bereichen Projektleitung, Konstruktion, Verfahrenstechnik, Arbeitsvorbereitung, Schweißüberwachung, Qualitätssicherung und Baustellenleitung bestand. Als wichtigster Optimierungspunkt wurde die Verbindung zwischen Sammler und Absorberrohren identifiziert. Die Konstruktion mit den Weldolets führte zu einem hohen Schweißaufwand, Verzug des Sammlers und einem entsprechend großen Aufwand bei der mechanischen Nacharbeit. Für eine kommerzielle Umsetzung ist eine intensive Arbeitsvorbereitung notwendig, einschließlich der Erstellung von Mockups und Konzepten zum Bauteilhandling.

Im Rahmen des Basic Engineering (AP 9.2) wurden die Rahmenbedingungen definiert und die Verfahrensplanung durchgeführt. Eine Designstudie zum Paneldesign wurde gestartet, wobei der Fokus auf der Anbindung der Absorberrohre an einen Sammler lag. Verschiedene Sammlerformen wurden berücksichtigt, und nach Betrachtung der Panelvarianten wurde ein erstes

Design entworfen. Die Positionierung des Sammlers wurde kritisch hinterfragt, und es wurde zunächst entschieden, das asymmetrische Design weiterzuverfolgen, da es fertigungstechnische Vorteile bietet. Einige Punkte bezüglich des Basic Engineering des Receiverpanels wurden intensiv mit Aalborg CSP (ACSP) diskutiert. Zur thermischen Auslegung des Receivers werden zwei verschiedene Strategien verfolgt, die jedoch zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Somit konnte auch das von den Projektpartnern verwendete Verfahren validiert werden. Ein weiterer Diskussionspunkt war die Verfügbarkeit und Fertigbarkeit von nahtlosen Rohren für die Absorberrohre. Während Mannesmann Stainless Tubes Rohre aus Edelstahl bis zu einer Länge von 23 m zur Verfügung stellen kann, konnte für Nickelbasislegierungen kein Rohrerhersteller gefunden werden, der nahtlose Rohre mit einer Länge von mehr als 11,8 m herstellen kann. Daher muss bei der Verwendung von Nickelbasislegierungen auf Rohre mit Längsnaht zurückgegriffen werden.

Im Rahmen von AP 9.3 wurde das P&ID des Testreceivers auf das kommerzielle Design übertragen und notwendige Anpassungen durchgeführt. Auch ein Blockfließbild wurde erstellt und an die Änderungen angepasst.

Im Rahmen der Sicherheitsstudie (AP 9.4) wurden die Verfahrenstechnik des Testreceivers mit jener des kommerziellen Receivers verglichen. Dabei wurden die verschiedenen Druckkreise Schritt für Schritt miteinander verglichen. Die wesentlichen Unterschiede ergeben sich bei der Dimension der Bauteile, der Länge der Absorberrohre und der Anzahl der Rohre pro Panel. Zudem werden beim kommerziellen Design zwei parallele Strömungspfade umgesetzt, die zwei Regelventile und damit auch zwei Regelkreise erfordern. Die Sammler werden in sogenannten Sammleröfen durch Strahlungswärme erwärmt und nicht durch eine Begleitheizung. Der Druck im Auslasstank wird auf unter 0,5 barg begrenzt, da somit ein kosteneffizienteres Design möglich ist. Diese und weitere Punkte wurden dokumentiert und können bei einer kommerziellen Umsetzung als Basis für die notwendige Sicherheitsstudie herangezogen werden.

In AP 9.5 wurde das Themenpaket Layout, Piping und Instrumentation bearbeitet. Nachdem die Rohrleitungsgrößen bestimmt worden sind, wurde die Rohrleitungsplanung begonnen. Das Montage- und Wartungskonzept wurde auf Basis des Detail Engineerings vom Panel weiterentwickelt. Die Rohrleitungen im Receiver wurden in Zusammenarbeit mit ACSP ausgelegt, wobei insbesondere die Anordnung der Rohrleitungen definiert wurde. Zusätzlich wurden die Wandstärken der Rohrleitungen durch Festigkeitsberechnungen definiert und Stutzenlasten ermittelt. In mehreren Iterationen wurden durch Flex-Berechnungen die Lagerungs- und Aufhängungspunkte definiert sowie Anpassungen an den Rohrleitungen durchgeführt. Auch das notwendige Gefälle, welches zur vollständigen Entleerung der Rohrleitungen vorgesehen ist, wurde im Design berücksichtigt. Die Entwicklung wurde in Isometrien und entsprechenden Rohrleitungslisten festgehalten. Das Betriebs-, Regelungs- und Sicherheitskonzept wurde analog zu den Vorarbeiten aus AP 3 vorgesehen, wobei kleinere Änderungen aufgrund der Hochskalierung durchgeführt wurden.

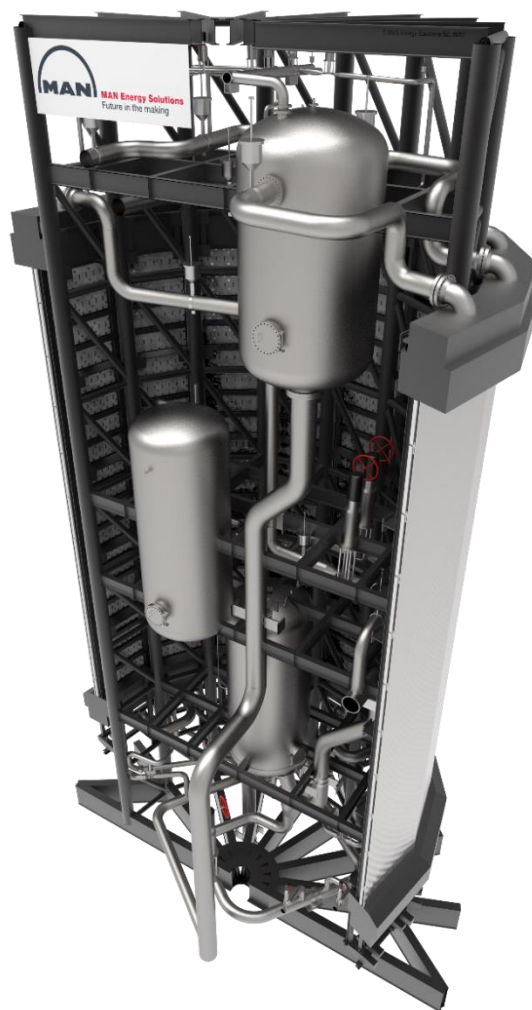
Ein erstes Design einer detaillierten Panelkonstruktion (AP 9.6) wurde unter Berücksichtigung der Fertigung, Montage und Wartung erstellt. Dabei konnte die Rohrvielfalt im Vergleich zum Basic Engineering deutlich reduziert werden. Im mittleren Bereich des Teilmoduls sind lediglich 2D-gebogene Rohre notwendig, womit sich der Bereich mit 3D-Rohrbiegungen nun auf den Außenbereich der Sammler beschränkt. Das Lagerungskonzept konnte deutlich weiterentwickelt werden. Der obere Sammler wird über eine Festlagerung fixiert, wobei eine Ausdehnung in Längsrichtung symmetrisch zur Sammlermitte ermöglicht wird. Der untere Sammler wird mittels Konstantstützen gelagert. Über ein mehrstufiges Konzept kann das Sammlergewicht in unterschiedlichen Betriebszuständen aufgenommen und eine freie Längenausdehnung der Absorberrohre gewährleistet werden. Des Weiteren sind die sogenannten Clips zur axialen

Führung der Absorberrohre und Unterbindung des Ausbeulens nach vorne ausgearbeitet worden. Berechnungen zeigten, dass insbesondere an den Verbindungen zwischen den Absorberrohren und dem Sammler besonders hohe Beanspruchungen auftreten. Daraus können einige Optimierungen abgeleitet werden: Die Rohranschlüsse sollten so gestaltet werden, dass sie um weniger als 45° im Vergleich zur bestrahlten Rohrebene gedreht sind. Zudem ist ein symmetrisches Design zu bevorzugen, da dabei die Einbringung von Momenten deutlich reduziert werden kann. Die Absorberrohre sollen aus einer Nickelbasislegierung mit einem größeren Durchmesser von 60,3 mm x 1,65 mm gefertigt werden. Pro Panel sind nun 54 Rohre vorgesehen. Für die Steigerung der Wirtschaftlichkeit ist auch die Geometrie der Weldolets im Vergleich zum Testreceiver überarbeitet worden. Insbesondere der Schweißaufwand und damit die Wärmeeinbringung konnte im Vergleich zu Standard-Weldolets deutlich reduziert werden. Im Detail Engineering wurde im Rahmen der Zusammenarbeit mit ACSP ein Konzept für die Vorwärmung der Sammler erarbeitet. Eine besondere Herausforderung ist der sogenannte Kamineffekt, der die Verluste im unteren Sammler erhöht. Vor allem dadurch entsteht pro Panel eine thermische Verlustleistung von 1600-1800 W. Unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Sammlers und der gewünschten Aufheizzeit von 90 Minuten resultiert eine erforderliche Heizleistung von 36 kW. Dies kann laut ACSP mit einer Begleitheizung, ähnlich zum Testreceiver, realisiert werden. In weiteren Untersuchungen wurde ein alternatives Konzept zur Vorwärmung der Sammler und Verbindungsbögen, den sogenannten „Receiver-Öfen“, erarbeitet. Durch die Nutzung der Öfen kann die Heizverlustleistung reduziert werden, so dass die Vorwärmung der Sammler und Verbindungsbögen innerhalb einer halben Stunde durchgeführt werden kann. Eine weitere wichtige Komponente ist der Strahlungsschutz hinter den Absorberrohren. In Zusammenarbeit mit einem Isolierungshersteller wurden verschiedene Isolierungsaufbauten untersucht und bzgl. ihrer Einsatzfähigkeit bewertet. Letztendlich wurden niedrig-biopersistente Erdalkalifasern (AES-Wolle) als präferiertes Material ausgewählt. Zwei verschiedene Konzepte ermöglichen, dass die gewünschte Isolationsdicke von 120 mm und die Oberflächentemperatur von 55 °C nicht überschritten werden.

Das Rohrleitungssystem ist ausgearbeitet, sodass nun Isometrien, eine Rohrleitungsliste, ein 3D-Modell und die Klassifizierung für alle Rohre, Dichtungen und Armaturen vorliegen. Auch die notwendigen Tanks (Eintank-, Auslass- und Notlufttank) wurden ausgelegt und konstruktionstechnisch umgesetzt. Ebenso wurde ein Konzept für die Stahlstruktur des Receivers in Zusammenarbeit mit schlaich bergemann partner erarbeitet, strukturell bewertet und konstruktionstechnisch umgesetzt. Der Strahlungsschutz über und unter den Absorberrohren wurde in Zusammenarbeit mit dem DLR ausgearbeitet. Dabei sind die Erfahrungen aus dem Multifokusturm in Jülich eingeflossen. Das finale Receiverdesign kann dem Rendering in Abbildung III- 26 entnommen werden. Durch die Arbeiten in diesem Arbeitspaket ist MAN nun für CSP-Receiver angebotsfähig.

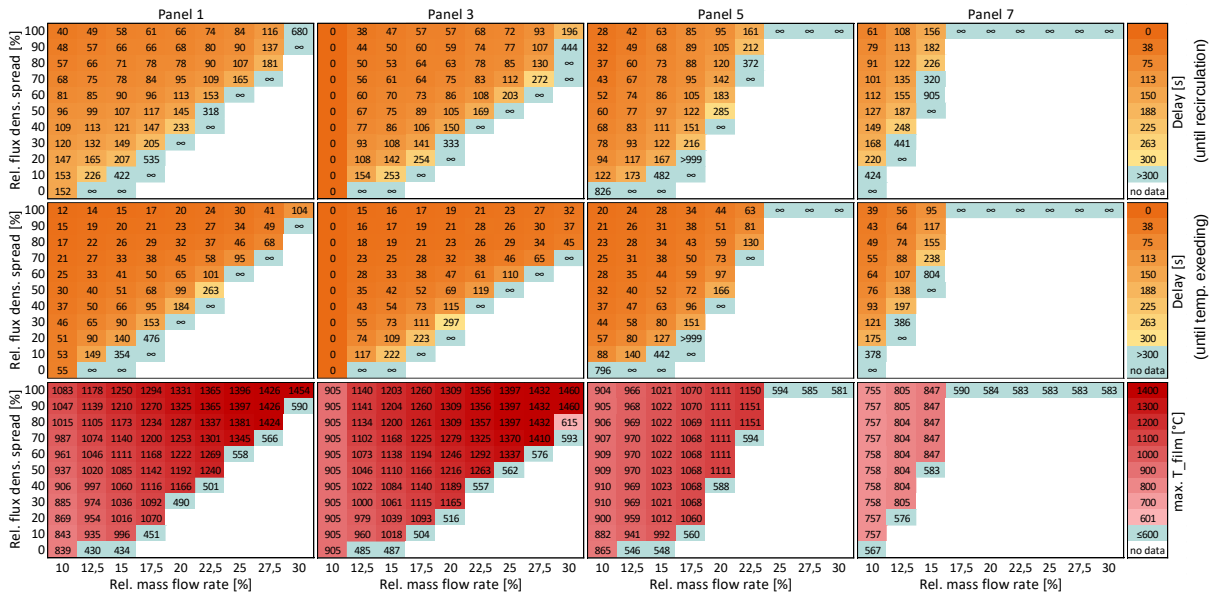
Ziel des Arbeitspaketes AP 9.7 war die Überprüfung und Optimierung des Designs mittels CFD und FEM. Die Werkstoffauswahl ist ein wichtiger Faktor bei der Kostenoptimierung von solaren Receivern. Austenitische Edelstähle sind kostengünstiger, aber Nickelbasislegierungen haben bessere mechanische Eigenschaften im Hochtemperaturbereich. Vergleichsrechnungen zeigten, dass Nickelbasislegierungen geringere Ermüdungs- und Kriechschädigungen aufweisen. Eine Lebensdauerbewertung des Paneldesigns nach ASME BPVC Section III Division 5 wurde durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass der Werkstoff DMV 310N unter hoher Einstrahlung ungeeignet ist. Für die aktualisierte Receivergeometrie wurde der Werkstoff auf Haynes 230 geändert. Drei Lastfälle wurden betrachtet, wobei die gewünschte Lebensdauer von 30 Jahren in zwei Fällen erreicht wurde. Im dritten Fall war eine Reduktion der Flussdichte notwendig.

Das SIJ führt dynamische Simulationen des kommerziellen Receiverdesigns durch, um kritische Betriebszustände zu identifizieren. Die Ergebnisse zeigten, dass bei ungleichmäßiger Bestrahlung und geringem Massenstrom eine ungleichmäßige Durchströmung der Absorberrohre auftreten kann, was zu extremen Temperaturen führt. Es wurde festgestellt, dass eine Massenstromumkehr in einzelnen Receiverrohren bei hohen horizontalen Flussdichtegradienten und geringen Massenströmen auftreten kann. Die Simulationen zeigten, dass die Temperaturen in den Absorberrohren bei solchen Bedingungen extrem ansteigen können, was zu einer Zersetzung des Salzes führen würde. Es wurden Strategien zur Erkennung und Vermeidung dieser Betriebspunkte entwickelt. Außerdem wurden Parameterstudien durchgeführt, um die Auswirkungen von Flussdichtegradienten und Massenströmen auf die Stabilität der Strömung zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden zwei Szenarien entworfen. Im ersten Szenario wurde die maximal zulässige Flussdichte auf das Panel aufgebracht und dann herunterskaliert, sodass das Salz über dem Panel seine Solltemperaturänderung erfährt (siehe Abbildung



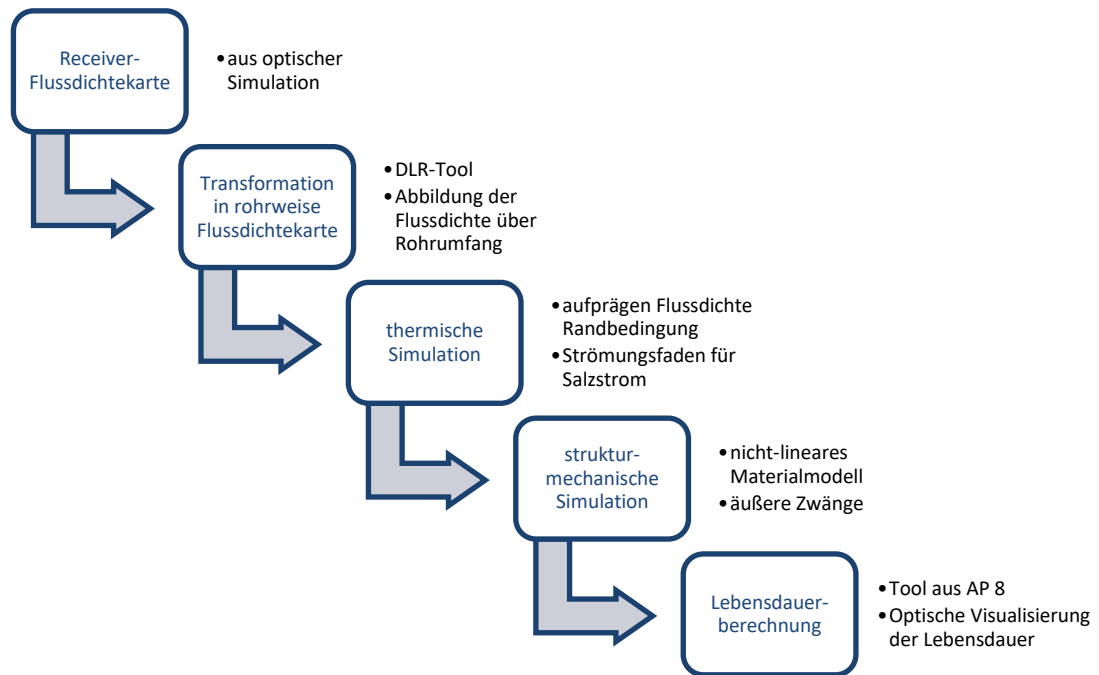
III- 26: 3D-Rendering des kommerziellen Receivers

III- 27). Im zweiten Szenario wurde der Flusssdichtegradient appliziert, wobei das am stärksten bestrahlte Rohr immer mit der maximalen zulässigen Flusssdichte bestrahlt wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass bei sehr geringem Massenstrom und hohen Flusssdichtegradienten die Strömung instabil wird und Temperaturgrenzwerte überschritten werden. Um die Relevanz der Ergebnisse für den Betrieb eines Solarkraftwerks in der Realität abzuschätzen, wurde eine Simulation durchgeführt, in der die horizontalen Flusssdichtegradienten auf den kritischen Panels an einem normalen Tag mit Wolkendurchzug ermittelt wurden. Es wurde festgestellt, dass selbst ohne störende Faktoren erhebliche horizontale Flusssdichtegradienten auftreten können, die zu instabilen Betriebszuständen führen können.



III- 27: Ergebnisse Szenario 1: Zeit bis zum Auftreten eines Naturumlaufs (oben), Zeit bis zur Überschreitung der Filmtemperaturlimits (Mitte) und in der Simulation maximal aufgezeichnete Filmtemperatur (unten).

DLR und MAN haben eine Berechnungsroutine zur thermischen und mechanischen Simulation eines gesamten kommerziellen Receivers erstellt (siehe Abbildung III- 28). Diese Routine basiert darauf, dass MAN eine Flusssdichtekarte für den gesamten Receiver erhält, die dann durch ein beim DLR entwickeltes Tool bearbeitet wird. Für die weiteren Simulationen wird der Receiver in einzelne Panels unterteilt, und für jedes Panel wird ein eigenes Modell verwendet. Die thermische Simulation berücksichtigt die Flusssdichte und die Salztemperatur in Form eines Strömungsfadens. Die resultierende Temperaturverteilung wird dann als Randbedingung für die strukturmechanische Simulation verwendet. Aus der strukturmechanischen Simulation resultieren die elastischen und plastischen Dehnungen sowie die Spannungen, die im Postprocessing zu einer Lebensdauer in Jahren verarbeitet werden. Die Lebensdauersimulation des kommerziellen Receiverdesigns wurde basierend auf den Flusssdichtekarten durchgeführt. Für ein besseres Modell-Handling wurden nur einzelne Ausschnitte aus dem gesamten Panel betrachtet. Die Ergebnisse zeigten, dass in keinem Punkt die Ziellebensdauer von 30 Jahren unterschritten wurde. Lediglich lokal, im Bereich der Rohrhalterungen, wurde die Lebensdauer nicht erreicht. Diese Stellen müssten bei einem konkreten Auftrag nochmals detaillierter betrachtet werden.



III- 28: Berechnungsroutine für kommerziellen Receiver

Durch die Iteration des Paneldesigns wurden einige Optimierungen (AP 9.8) bereits in das aktuelle Konzept eingearbeitet. Thermische Spannungen wurden durch einen maximalen Winkel von 45° zwischen der bestrahlten Absorberrohrebene und den Rohranschlüssen am Sammler sowie durch ein symmetrisches Design reduziert. Der Fertigungsaufwand wurde durch größere Rohrdurchmesser und eine modifizierte Weldolet-Geometrie verringert.